

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-023689

(43)Date of publication of application : 24.01.2003

(51)Int.Cl.

H04R 3/00

(21)Application number : 2001-208073

(71)Applicant : SONY CORP

(22)Date of filing : 09.07.2001

(72)Inventor : HARUYAMA SHINICHIRO  
MOHAMMAD GHAVAMI

## (54) VARIABLE DIRECTIVITY ULTRASONIC WAVE SPEAKER SYSTEM

### (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To facilitate arrangement of elements in an ultrasonic wave speaker that employs a piezoelectric element ultrasonic wave transducer to direct a beam.

SOLUTION: An ultrasonic wave modulator modulates an ultrasonic wave signal with a central frequency (f) on the basis of an input of an audible signal. Many delay lines delay the modulated ultrasonic wave signal in order to direct a beam pattern toward an angle  $\theta_0$ . A speaker outputs the ultrasonic wave signal by directing the beam pattern toward the angle  $\theta_0$ . The ultrasonic wave speakers are placed so that a center distance (d) is greater than half the wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic wave. Thus, the beam pattern has a main lobe and at least one grating lobe. The main lobe has a mode K and the grating lobe has an attenuation  $G_a$  with respect to the attenuation of the main lobe. Expression (1) holds between the values d, f, K,  $G_a$ , and  $\theta_0$ , where c is a sound velocity.

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^2 \theta_0}{\cos^2 \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right] \quad (1)$$

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of

rejection]

[Kind of final disposal of application other than  
the examiner's decision of rejection or  
application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-23689

(P2003-23689A)

(43) 公開日 平成15年1月24日 (2003.1.24)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード <sup>*</sup> (参考)	
H 0 4 R 3/00	3 1 0 3 3 0	H 0 4 R 3/00	3 1 0 3 3 0	5 D 0 1 9 5 D 0 2 0

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L 外国語出願 (全 48 頁)

(21) 出願番号 特願2001-208073(P2001-208073)

(22) 出願日 平成13年7月9日 (2001.7.9)

(71) 出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川6丁目7番35号

(72) 発明者 春山 真一郎

東京都品川区東五反田3丁目14番13号 株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所内

(74) 代理人 100094983

弁理士 北澤 一浩 (外2名)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 可変指向性超音波スピーカシステム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 圧電素子型の超音波変換器を用いてビームを指向させる超音波スピーカにおいて素子の配列を容易にすること。

【解決手段】 超音波モジュレータは、可聴信号の入力に基づいて中央周波数  $f$  を有する超音波信号を変調する。多数の遅延線路は、ビームパターンを角度  $\theta_0$  へ指向させるために、変調された超音波信号を遅延させる。スピーカはビームパターンを角度  $\theta_0$  へ指向させて超音波信

号を出力する。超音波スピーカは、中心間の距離  $d$  が超音波の半波長  $\lambda/2$  よりも大きくなるように配置されている。このためビームパターンは、メインローブと少なくとも1つのグレーティングローブとを有する。メインローブはモード  $K$  を有しており、グレーティングローブは、メインローブの減衰に対する減衰  $G_a$  を有する。 $d$ 、 $f$ 、 $K$ 、 $G_a$ 、 $\theta_0$  の値の間には以下の関係がある。ここで  $c$  は音速である。

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]$$

(2)

## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 入力した可聴信号に基づいて中央周波数  $f$  を有する超音波信号を変調し、変調された該超音波信号を出力するための超音波モジュレータと、該超音波モジュレータからの該変調された超音波信号を受信し、ビームパターンを角度  $\theta_0$  へ指向させるために該変調された超音波信号に異なる遅延が付加された状態で超音波信号を出力するための多数の遅延線路と、  
該遅延線路に一対一対応で接続された多数の超音波スピーカとを有し、

該スピーカは、該遅延線路により遅延の付加された変調\*

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]$$

があることを特徴とする超音波スピーカシステム。

【請求項 2】 該メインローブの伝搬路には、指向させる角度を広げるための凸面反射板が設けられていることを特徴とする請求項 1 記載の超音波スピーカシステム。

【請求項 3】 出力された可聴音のゆがみを減じるために、超音波モジュレータに入力した音声信号の処理を行うためのプリプロセッサを有していることを特徴とする請求項 1 記載の超音波スピーカシステム。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、超音波スピーカシステムに関する。

## 【0002】

【従来の技術】 従来の、音波を発生するスピーカにおいては、発生した音波は様々な方向に放射される。スピーカアレーを用いて、鋭く集中的な音波のビームを形成することは理論上は可能であるが、非常に多くのスピーカを用いることとなる。また、スピーカから発生される音波は、1.74~17.40m の範囲の値を採る比較的に長い波長を有しているため、また、波の動きの性質により、スピーカアレーは広大なスペースを占めることとなる。

【0003】 一方、超音波変換器（スピーカ）アレーは、狭い幅のビームを形成することができる。超音波は、音声信号によって AM 変調され、超音波変換器アレーを動作させ、AM 変調された超音波ビームを形成するために用いられる。AM 変調された超音波ビームは、空气中を伝搬しているときに、空気中の非線型伝搬効果により復調され、超音波の周波数帯域以外の周波数の可聴音のみが残る。パラメトリックアレーは、「音のスポットライト」を作るためにこの現象を用いており、音のスポットライト中にいる人にのみ音が聞こえるようにして

2

\*された超音波信号に基づいてビームパターンを角度  $\theta_0$  へ指向させた状態で超音波を出力し、中心間の距離  $d$  が超音波の半波長  $\lambda/2$  よりも大きくなるように配置されることにより、該ビームパターンは、メインローブと少なくとも 1 つのグレーティングローブとを有し、該メインローブはモード数  $K$  を有し、該メインローブに最も近い位置にある該グレーティングローブは該メインローブにおける減衰に対する減衰  $G_a$  を有し、 $c$  を音速として該距離  $d$ 、該周波数  $f$ 、該モード数  $K$ 、該減衰  $G_a$ 、及び、該角度  $\theta_0$  の値の間には、以下の関係：

10

【0004】 欧州特許第 0 973 152 A2 号では、回転可能に構成された反射面によって狭い幅の超音波ビームを反射することを提案している。超音波ビームは、反射面を回転させることによって所望の位置へ絞られる。超音波ビームが第 2 の面へ向かって反射されると、第 2 の面において超音波周波数は吸収され可聴音周波数が反射され、第 2 の面の方向から可聴音が聞こえる。第 2 の面が映画のスクリーンであれば、反射面を回転させることによって、スクリーン上を横切る映画のキャラクターに可聴音の聞こえる位置を追従させることができる。

【0005】 また、欧州特許第 0 973 152 A2 号には、超音波周波数が吸収され可聴音周波数が反射される曲面を用いることができ、この構成により、反射された可聴音は特定の視聴位置に向けられることが開示されている。

【0006】 また、欧州特許第 0 973 152 A2 号には、多数の超音波変換器モジュールを有し、これらが 2 次元又は 3 次元に構成された変換器アレーが開示されている。電気的に収束させたり指向させたりすることを容易にするために、変換器モジュールに印可される信号に可変的な相関関係のある位相をネットワークが付加する。信号は広帯域であるため、アレーからのビームを指向させるために遅延を用いることができる。

## 【0007】

【発明が解決しようとする課題】 本発明者は、圧電素子型の超音波変換器を用いてビームを指向させることを可能とする超音波スピーカシステムを製造しようと試みた。圧電素子型の超音波変換器は、直径が 1~4 cm の範囲である。超音波変換器をアレー中に組込むように配置することが非常に困難であることに気が付い

(3)

3

レベルであるためである。発明者は、超音波変換器アレーで発生した超音波ビームを指向させるためにこのような配置とすることは実現困難であることに気づいた。超音波変換器の素子を非常に小さくしなければならず、非常に短い距離で隔てられなければならないからである。

【0008】本発明の目的は、上記課題を解決し、アレー中においてスピーカの配置の自由度を持たせることを可能とした超音波スピーカシステムを提供することである。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明による超音波スピーカシステムは、超音波モジュレータと、多数の遅延線路と、遅延線路に一对一対応で接続された多数の超音波スピーカとを有している。超音波モジュレータは、入力した可聴信号に基づいて中央周波数 $f$ を有する超音波信号を変調し、変調された該超音波信号を出力する。遅延\*

4

\*線路は、該超音波モジュレータからの該変調された超音波信号を受信し、ビームパターンを角度 $\theta_0$ へ指向させるために該変調された超音波信号に異なる遅延が付加された状態で超音波信号を出力する。該超音波スピーカは、該遅延線路により遅延の付加された変調された超音波信号に基づいてビームパターンを角度 $\theta_0$ へ指向させた状態で超音波を出力する。該超音波スピーカは、中心間の距離 $d$ が超音波の半波長 $\lambda/2$ よりも大きくなるように配置されることにより、該ビームパターンは、メインローブと少なくとも1つのグレーティングローブとを有する。該メインローブはモード数 $K$ を有し、該メインローブに最も近い位置にある該グレーティングローブは該メインローブの減衰に対する減衰 $G_a$ を有する。 $c$ を音速として該距離 $d$ 、該周波数 $f$ 、該モード数 $K$ 、該減衰 $G_a$ 、及び、該角度 $\theta_0$ の値の間には、以下の関係：

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]$$

がある。

【0010】超音波スピーカは、中心間の距離 $d$ が超音波の半波長 $\lambda/2$ よりも大きい場合、非常に鋭いビームを形成することができ、選択された視聴者へ音を指向させることができる。

【0011】本発明者は、距離 $d$ 、周波数 $f$ 、モード数 $K$ 、減衰 $G_a$ 、及び、角度 $\theta_0$ の値の間には、特許請求の範囲に示したような関係のあることを認識した。スピーカシステム設計者は、減衰 $G_a$ をどのぐらいのレベルで許容できるかを指定し、モード数 $K$ について次の等式を解くことにより、スピーカの放射パターンを容易に計算するために上述の関係をを用いることができる。

【0012】設計者は、グレーティングローブを抑制するためスピーカに要求される放射パターンを決定するために、モード数 $K$ を次の等式に代入する。

$$A_1(\theta) = \cos^K(\theta)$$

【0013】遅延線路は、超音波スピーカから超音波が出力される前に変調された超音波信号に遅延を付加するため、ビームの指向を物理的に制御するのではなく電気的に制御することができる。

【0014】メインローブの伝搬路には、指向させる角度を広げるための凸面反射板を設けることが好ましい。凸面反射面が用いられるため、例えば、数度から10度以上といったように、所望の角度の制限範囲を広げるこ

【0015】また、出力された可聴音のゆがみを減じるために、超音波モジュレータに入力した音声信号の処理を行うためのプリプロセッサを有していることが好ましい。

【0016】また、超音波スピーカは圧電素子型であることが好ましい。圧電素子型超音波スピーカは高価ではない。しかし、1~4 cmといった具合にかなり大きいサイズであるため、互いに接近させることは困難である。本発明では、半波長 $\lambda/2$ よりも大きい間隔で配置するため、高価ではない圧電素子型超音波スピーカを用いることができる。

【0017】

【発明の実施の形態】本発明の上述の目的、他の目的、特徴、有利点については、添付の図面を参照しながら以下の実施例についての記述を理解することにより明らかになる。

【0018】本発明の実施の形態による超音波スピーカシステム10について、添付の図面を参照しながら説明する。図1に示すように、システム10は、超音波スピーカアレー20と、凸面反射板30と、信号処理器40と、入力ユニット50とを有している。超音波スピーカアレー20は、圧電素子タイプの5つの超音波スピーカ21a~21eからなる一行をなしている。

【0019】図2に示すように、入力ユニット50は、音声信号入力ユニット51と所望角度 $\theta_0$ 入力ユニット

(4)

5

聴音に代表される音声信号を入力する。所望角度  $\theta_0$  入力ユニット52は、ビームの方向を特定するための所望角度  $\theta_0$  で表されるデータを入力し、信号処理器40へ出力する。

【0020】信号処理回路40は、プリプロセッサ41と、超音波モジュレータ42と、可変遅延ユニット43と、超音波信号源44とを有している。プリプロセッサ41は、出力される可聴音のゆがみを減じるために、音声信号入力ユニット51からの音声信号の前段処理を行う。プリプロセッサ42は、The Journal of Audio Eng. Soc., Vol. 47, No. 9, 1999 September 中の「一般的な可聴音ビームのための空中を伝達する超音波の利用」に記載されているF. Joseph Pompeiの方法に従い動作する。この内容については、同刊行物を参照されたい。

【0021】超音波信号源44は、超音波モジュレータ42へ超音波信号を出力する。超音波信号は、20KHzよりも高い中央周波数  $f$  を有している。超音波モジュレータ42は、プリプロセッサ41によって処理された音声信号入力に基づいて超音波信号を変調し、変調された超音波信号  $x(t)$  を可変遅延ユニット43へ出力する。

【0022】可変遅延ユニット41は、複数の調整可能な遅延線路43a～43eを有している。遅延線路43a～43eは、それぞれ超音波モジュレータ42からの変調された超音波信号を受信し、所望角度  $\theta_0$  入力ユニット52において入力した所望角度  $\theta_0$  へとビームを指向させるために、それぞれ異なる遅延が付加され変調された超音波信号を出力する。遅延時間は、所望ビーム角度  $\theta_0$  に基づき各スピーカ21a～21eについて計算され、可変遅延回路に対して設定される。

【0023】図3に示すように、アレー20の各スピーカ21は、数度乃至10度の音圧指向性を有している。図4に示すように、アレー20は、直線上に配列された5つの超音波スピーカ21a～21eからなる一次元アレーにより構成されている。5つの超音波スピーカ21\*

6

\*a～21eは、一対一対応で遅延線路43a～43eに接続されている。このため、スピーカ21a～21eは、遅延線路43a～43eによって遅延が付加された変調された超音波信号に基づき、異なる超音波を発生する。図5、6、及び7に示すように、超音波は、所望角度  $\theta_0$  (図5、6、及び7においては、 $\theta_0$  はそれぞれ-3、0、及び+5である) に指向されたメインローブ71を有する超音波ビームパターン70を発生するために組合せられる。超音波ビームは空气中を伝搬するため、空気非線型効果により可聴音が発生する。

【0024】超音波スピーカ21a～21eは、中心間の距離が  $d$  となるように配置されている。  $d$  は、超音波スピーカ21a～21eから発生する超音波の半波長  $\lambda/2$  よりも大きい。中心間の距離  $d$  が超音波の半波長  $\lambda/2$  よりも大きい場合、アレー20中におけるスピーカ21a、21eの配置を極めて容易とすることができる。また、図5、6、及び7に示すように、結果として生ずるビームパターン70は好ましい狭い幅のメインローブ71を有している。メインビームが鋭いため、より特定された視聴者に向けることができる。これに対して図8は、中心間の距離  $d$  が超音波の半波長  $\lambda/2$  に等しい場合に発生したビームパターンを示している。メインローブが幅広いことに注意されたい。

【0025】メインローブ71は、ローブ71の幅に影響を与えるモードナンバー  $K$  を有している。即ち、図9に示されるように、  $K$  の値が大きくなればなるほどビーム幅は狭くなる。

【0026】図5、6、及び7に示すように、中心間の距離  $d$  が超音波の半波長  $\lambda/2$  よりも大きいときには、結果として生ずるビームパターン70は少なくとも1つのグレーティングローブを有している。メインローブ71に近いグレーティングローブ72は、メインローブ71の減衰に対する減衰  $G_a$  を有している。他のグレーティングローブは、何れも減衰がはるかに大きい。

【0027】後述のように、中心間の距離  $d$ 、周波数  $f$ 、モード数  $K$ 、減衰  $G_a$ 、及び、角度  $\theta_0$  の間には、次のような関係がある。

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right] \quad (1)$$

ここで、  $c$  は音速である。

【0028】図10には、それぞれ個々のスピーカの中心間の距離  $d$  が1.5cmで配置されているスピーカアレーから発生したビームパターンが示されている。これらのスピーカは、55～65KHzの周波数、即ち、半波長  $\lambda/2$  が2.6～3.1mmである超音波を発生す

よりも遙かに大きい。このため、グレーティングローブ72は、メイン(0)ビーム71の左側又は右側に発生し、これらは、スピーカ表面に対して垂直の方向に指向している。

【0029】図10に示される例においては、音波は無指向性で全方向に発生され、同一の振幅及び位相を有す

(5)

7

アレーは、図6の円弧状の線で示されるような狭い範囲の音圧指向特性SPDを有している。このため、実際のビームパターンは図6に示すようになる。即ち、このビームパターンは、無指向性と仮定された図10のビームパターンと、スピーカ自身の音圧指向特性SPDとを組合せて得られたものである。グレーティングローブは、スピーカ自身の音圧指向特性を適切に利用することによって減ずることが可能であり、このようにしてビームは一方方向のみに統合され、グレーティングローブを排除することが可能となる。

【0030】スピーカアレー20からの音波の方向は、遅延線路43a～43eにおいて遅延時間を変えることによって、角度 $\theta_0$ だけ左又は右に振ることができる。しかし、可変可能な角度の範囲は、図5又は7に示すようなスピーカの音圧指向特性により制限されている。ある場合には、超音波アレー20の放射パターンによって数度から20度までに制限される。また、指向させることが可能な角度の範囲は、等式(1)に用いられている変数が実際に採りうる範囲により制限される。凸面反射板30を設けることによって、ビームにおける可変可能な角度の範囲を広くすることができる。

【0031】ここで、本発明による超音波スピーカシステムの応用例を示す。

【0032】図11は、1つの部屋の中において、通常の聴力を有する人と一緒にテレビを見ている難聴のテレビ視聴者の一例を示している。大音量の可聴音ビームは、難聴の視聴者に向けられている。ビームは、音の通常の無指向性放射よりも大音量であるため、難聴の視聴者はより容易に聞くことができる。しかし、ビームは鋭い指向性を有しているため、周囲のテレビ視聴者をうるさからせることはない。

【0033】図12は、日本語のトラックと英語のトラックとを含むテレビ番組を見ているグループを示している。英語のトラックのビームは、グループ中の英語バージョンの視聴を希望する一人に向けられており、他の者は、日本語バージョンである無指向放射による音声を視聴している。

【0034】図13は、従来の5つのスピーカとサブウーファースとが用いられて、従来の方法によってサラウンド音声を実現されている状態を示している。図14は、本発明に基づき1つのスピーカから高指向性の音声ビームを発生させることによって、サラウンド音声を実現している様子を示している。必要に応じて壁でビームを反\*

$$A(\theta) = A_1(\theta)A_2 \quad (5)$$

ここで、 $A_1(\theta)$ は、角度に依存した要素の利得であり、 $A_2$ は、距離に依存した減衰である。

8

\*射させることにより、視聴者は5つの異なる方向からの音を聞くことができる。ビームの方向は、部屋の形状等を考慮に入れることにより容易に調整することが可能である。

【0035】ここで、本発明の背景にある基本的な理論を説明する。

【0036】Nをスピーカアレー20中のスピーカの数とし、 $n=1, 2, \dots, N$ として、調整可能な遅延線路43a～43eの各々を $T_n$ で表すことができる。

10 Nは実施例においては5である。調整可能な遅延線路 $T_n$ は、以下に示す指向ビームパターンのメインローブの所望角度 $\theta_0$ によって決まる。

$$T_n = T_0 + (n-1) \frac{d}{c} \sin \theta_0 \quad (2)$$

【0037】固定遅延 $T_0$ は、

$$T_0 \geq (N-1) \frac{d}{c}$$

であることが要求される。 $T_0$ を除いて考えると、 $\theta_0$ の負の値に対しては負の遅延が得られるが、このような値を満たすことはできないからである。ファースフィールドにおいて方向 $\theta$  ( $-90 < \theta < +90$ ) で受信された信号は、

$$y(t) = A(\theta) \sum_{n=1}^N x_n(t - \tau_n)$$

$$= A(\theta) \sum_{n=1}^N x(t - T_n - \tau_n) \quad (3)$$

30 に等しい。ここで、 $X_n(t)$ はスピーカnから発生された信号であり、 $\tau_n$ は各素子と視聴者との間の距離の違いから生ずる遅延であり、 $A(\theta)$ は各素子と伝搬路の総合利得である。

【0038】図2の例における時間遅延 $\tau_n$ は、

$$\tau_n = \tau_0 - (n-1) \frac{d}{c} \sin \theta \quad (4)$$

に等しい。ここで $\tau_0$ は、第1スピーカ $x_1(t)$ の固定伝搬遅延(constant transmission delay)であり、ファースフィールドにおける受信方向 $\theta$ に対して独立である。

【0039】利得 $A(\theta)$ は、以下のように2つの部分に分けることができる。

【0040】等式(4)、(5)を等式(3)に代入すると、

(6)

$$y(t) = A_1(\theta) A_2 \sum_{n=1}^N x(t - \alpha_0 - (n-1) \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta)) \quad (6)$$

を得る。ここで、 $\alpha_0 = T_0 + \tau_0$  である。

【0041】周波数ドメインは、

$$H(f, \theta) = \frac{Y(f, \theta)}{X(f)}$$

$$\frac{\sin \left[ \pi f N \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta) \right]}{\sin \left[ \pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta) \right]}$$

である。

【0042】等式(7)より、異なる周波数では異なる方向にビームパターンが形成されることが分かる。図8は、55~65 KHzの間に均一に分布する11の周波数について、中心間の距離dが半波長 $\lambda/2$ に等しいビームフォーミングスピーカアレーによって形作られた指向性パターンを示すグラフである。図8の例は、等式

(7)において基準化された振幅を示しており、以下の諸条件が等式(7)に代入されている。即ち、AM信号は、中央周波数fが60 KHzであり、帯域幅が10 KHzであり、ファーフールド受信方向 $\theta_0$ が $10^\circ$ 、 $-90 < \theta < +90$ であり、スピーカの数Nが10であり、スピーカの中心間の距離dが2.6 mmであり、音速cが340 m/sであり、角度に従属関係を有する利得A( $\theta$ )は距離に關係する減衰A<sub>2</sub>に等しい。所望ビーム角度 $\theta_0$ がファーフールド受信方向 $\theta$ と同一であるときには、信号対ノイズ比dBは全ての周波数において同一であり、信号対ノイズ比は周波数から完全に独立していると考えられるが、所望ビーム角度 $\theta_0$ とファーフールド受信方向 $\theta$ との差が大きくなるにつれて、信号対ノイズ比dBは周波数に依存して増加すると考えられる。しかし、ビーム形成器は分別帯域幅は10/60、即ち17%である。変調されていないことのみが異なりその他は同一のメッセージの場合には、分数帯域幅は5/2.5、即ち、200%である。従って、帯域幅に対する中央周波数の比が非常に大きく、ビーム形成を行うのが困難であるため、変調されている超音波ではなく変調されていない音声信号について1つのビーム形成\*

\*器を用いようとしても役に立たない。より複雑なフィルターを利用したビーム形成器が必要である。更に、スピーカの中心間の距離dが2.6 mmであるため、実際にスピーカアレーを作ることが極めて困難かおそらく不可能である。

【0043】半波長 $\lambda/2$ よりもスピーカの中心間の距離dを大きくすることによりスピーカアレーをより容易に作ることができる。また、このように大きくすることにより鋭いメインビームとなる。メインビームが鋭いため、より特定された視聴者へ指向させることが可能である。一方、このように大きくすることにより、スピーカから発せられる音の視聴者が通常いる場所、即ち、 $-90 < \theta < +90$ の範囲の角度において、好ましくないグレーティングローブを形成する。

【0044】このようにして、グレーティングローブの角度及びその存在状況は決定される。等式(7)は、角度に従属関係を有する利得A( $\theta$ )が距離に依存する減衰A<sub>2</sub>に等しいと仮定し、ファーフールド受信方向 $\theta$ が所望ビーム角度 $\theta_0$ に等しいときに書換えることができる。換言すれば、等式(7)は、メインローブが完璧な変換器であると仮定すると以下の等式で書換えることができる。

$$|y(f, \theta)| = A_2 N \quad (8)$$

【0045】また、等式(8)の關係は、グレーティングローブとなる他の角度 $\theta_g$ に対しても成り立っている。グレーティングローブの角度 $\theta_g$ を計算するために、先ず、等式(7)より以下のように決定される。

$$|y(f, \theta_g)| = A_2 N = A_2 \frac{\sin \left[ \pi f N \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_g) \right]}{\sin \left[ \pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_g) \right]} \quad (9)$$

【0046】ここで、等式(9)はグレーティングロー



(7)

$$\left[ \sin \pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_s) \right] = 0 \quad (11)$$

$$\pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_s) = m\pi \quad (10)$$

ここで、 $m = \pm 1, \pm 2, \dots$  とする。故に、

$$\theta_s = \sin^{-1}(\sin \theta_0 - m \frac{c}{df}) \quad (11)$$

【0047】第1グレーティングローブは、 $m = \pm 1$  とすることにより得られる。 $-90 < \theta < +90$  の値を採るグレーティングローブの角度  $\theta_g$  が存在しない場合には、ビーム形成のネットワークはグレーティングローブを発生させないことが分かる。所望ビーム角度  $\theta_0$  が  $\pm 90$  の値を採るときに、最悪のグレーティングローブが発生する。等式 (11) より以下の関係が決定される。即ち、半波長  $\lambda/2$  よりもスピーカの中心間の距離  $d$  が小さいときには、グレーティングローブは発生しない。

【0048】

$$\frac{c}{df} \geq 2$$

他は、

$$d \leq \frac{c}{2f} = \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

【0049】グレーティングローブの角度  $\theta_g$  はスピーカの数  $N$  の関数ではなく、スピーカの中心間の距離  $d$  に完全に依存していることは興味深いことである。

【0050】スピーカの中心間の距離  $d$  が半波長  $\lambda/2$  よりも大きいときのグレーティングローブが現れる様子 30 を示す。図10は図8と同様の状態を示すグラフであるが、スピーカの中心間の距離  $d$  は15mmでありスピーカ\*

$$INBW = \sin^{-1}(\sin \theta_0 + \frac{c}{dfN}) - \sin^{-1}(\sin \theta_0 - \frac{c}{dfN}) \quad (16)$$

【0054】

$$\left| \sin \theta_0 \pm \frac{c}{dfN} \right| > 1$$

であれば、所望ビーム角度  $\theta_0$  の左側又は右側において、ヌルビームが現れないことは明らかである。特殊な 40 ケースとしては、所望ビーム角度  $\theta_0$  がゼロの場合があるが、この場合中間ヌルビーム幅  $INBW_0$  は、

$$INBW_0 = 2 \sin^{-1}(\frac{c}{dfN}) \quad (17)$$

となる。

【0055】即ち、スピーカの中心間の距離  $d$  を大きくすることにより、中間ヌルビーム幅  $INBW$  の値が小さくなり、鋭いビームが形成されることが理解できる。図 8、10 の例で用いられている条件の下で、等式 (1

12

\*カの中心間の距離  $d$  は半波長  $\lambda/2$  よりも大きくなっている。スピーカ間をこのように大きくした結果、グレーティングローブが発生している。60 KHz の周波数  $f$  に最も近いグレーティングローブは、33.5 ~ -11.8 度の間にあり、等式 (11) と一致していない。ファースト受信角度  $\theta$  が所望角度  $\theta_0$  と異なれば異なるほど、ビームパターンが周波数により大きく依存するようになる。

【0051】図10に示すメインビーム71が、図8に示すメインビームよりも遙かに狭くなっていることは注目すべきことである。これに相当する等式は容易に導き出せる。中間ヌルビーム幅 (inter-null beam width)  $INBW$  は、所望のビーム角度  $\theta_0$  の周りの最も近い2つのヌルビームによって定義される。中間ヌルビーム幅  $INBW$  をゼロと仮定すると、等式 (7) から以下の関係が定まる。

$$\pi f N \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta) = m\pi \quad (13)$$

20 ここで、 $m = \pm 1, \pm 2, \dots$  である。

【0052】所望ビーム角度  $\theta_0$  の周りの2つの角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  は、 $m$  を  $m = +1$ 、 $m = -1$  とすることにより等式 (13) より計算することができ、それぞれ以下のようにになる。

$$\theta_1 = \sin^{-1}(\sin \theta_0 - \frac{c}{dfN}) \quad (14)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}(\sin \theta_0 + \frac{c}{dfN}) \quad (15)$$

【0053】このようにして一番近い2つの角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  について 30 の中間ヌルビーム幅は、 $INBW \Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$  であり、以下のように決定される。

下では、図8、10の例における中間ヌルビーム幅  $INBW$  の値を、それぞれ25.6、4.4度と算出することができる。

【0056】上述の説明より、スピーカの中心間の距離  $d$  を大きくすることによって、鋭いビームとすることができ、多くのグレーティングローブを生ずることが理解できる。次に、スピーカアレイ20のスピーカ21の指向パターンについて、より詳細に説明する。スピーカは、それぞれ指向性があり、次の放射パターンにより示される、角度に従属関係を有する基準化利得  $A_1(\theta)$  を有している。

$$A_1(\theta) = \cos^K(\theta) \quad (18)$$

【0057】ここで、 $K$  は放射ローブ (radiation lobe) のモード数である。

(8)

13

ざまな周波数特性や指向性を有するものが生産されている。超音波スピーカの異なる放射パターンは、等式(18)中のモード数Kを適宜代えることにより概略的に表すことができる。図9は、モード数Kを幾つかの様々な値に代えてみたときに、1つの超音波変換器によって形成される放射パターン(角度に依存する基準化利得 $A_1$ )\*

$$|H(f, \theta_g)| = A_1 N \cos^K(\sin^{-1}(\sin \theta_0 \pm \frac{c}{df})) \quad (19)$$

【0060】指向性のあるエレメントであると仮定できるため、ファースフィールド受信方向 $\theta_0$ やグレーティングローブ角度 $\theta_g$ について、それぞれ

$$-20 \log \cos^K \theta_0 \text{ dB}$$

$$-20 \log \cos^K(\sin^{-1}(\sin \theta_0 \pm \frac{c}{df})) \text{ dB}$$

$$K = \frac{G_g}{20 \log \left[ \frac{\cos \theta_0}{\cos \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]} \quad (20)$$

【0061】等式(20)中の正負の符号(±)は、ファースフィールド受信方向 $\theta$ の負又は正の値にそれぞれ用いられる。

【0062】ほとんどの等式において中央周波数 $f$ が含まれていることは、計算及びその結果が周波数に従属関係を有していることを示している。必要なときには、等式(20)中のモード数Kのように、信号のキャリアの中央周波数 $f$ を推定パラメータに用いることができる。例えば、±5の値のファースフィールド受信方向 $\theta_0$ における、最も近いグレーティングローブの角度において、減衰 $G_a$ の値として30 dBが許容されるときには、図10に示されるアレーでは、モード数Kの値は85.7が要求される。図5、6、及び7は、モード数Kが85.7の値の場合であって、所望ビーム角度 $\theta_0$ がそれぞれ-3、0、5である場合のスピーカアレーの指向性パターンの全体を示している。モード数Kを高い値とすることによって、グレーティングローブの減衰 $G_a$ が大きくなるが、これと同時に、ビーム指向性として有用な角度 $\theta_0$ の範囲は狭くなる。減衰 $G_a$ と有用な角度 $\theta_0$ との間にはトレード関係がある。モード数Kが固定であり、メインローブの減衰に対する所望の減衰 $G_a$ が設定されると、対応するスピーカアレーとしての有用な角度 $\theta_0$ の範囲を決定するための試行錯誤を行うことにより、等式(20)を所望ビーム角度 $\theta_0$ について解くことができる。

【0063】本発明について、具体的な実施の形態を参照しながら詳細にわたり説明してきたが、本発明は、添

14

\* (θ) ) を示している。

【0059】等式(18)を等式(7)に代入し、ファースフィールド受信角度 $\theta$ がグレーティングローブ $\theta_g$ に等しいとして等式(7)を計算すると、 $m = \pm 1$ として等式(10)より次の結果が得られる。

10 といった減衰を生ずる。所望ビーム角 $\theta_0$ における減衰に対する、最も近いグレーティングローブの角度における要求される減衰 $G_a$  dBは、等式(1)を用いて計算することができる。即ち、

良が可能である。

【0064】例えば、本実施の形態においては、スピーカアレー20は5行の超音波スピーカを有していたが、10行の超音波スピーカとしても同様の効果を発揮する。

【0065】また、図15に示すような2次元スピーカアレー20'で代用してもよい。スピーカアレー20'はn行m列のスピーカ21を有している。この場合、信号処理器40'は、各列のスピーカについて遅延線路を有しており、各遅延線路からの信号は、対応する列中の全てのスピーカに送られる。各列において垂直に配列されたスピーカは、発生する音波のパワーを増大させる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態による超音波スピーカシステムを示す概念図。

【図2】図1の超音波スピーカシステムを示すブロック図。

40 【図3】超音波スピーカシステムに設けられた超音波スピーカの各々の音圧指向性を示す概念図。

【図4】超音波スピーカシステムに設けられた超音波スピーカアレーの音圧指向性を示す概念図。

【図5】スピーカの中心間の距離が半波長よりも大きいスピーカアレーから発生した超音波を表すグラフであり、-3の値の狭いメインローブ指向性を有する超音波ビームパターンを発生させるために超音波が組合せられている状態を示しており、また、スピーカアレーの音圧指向特性により許容された範囲内を示す。

(9)

15

波ビームパターンを発生させるために組合された、スピーカアレーから発せられた超音波を示すグラフ。

【図7】スピーカアレーから発生した超音波を表すグラフであり、+5の値の狭いメインローブ指向性を有する超音波ビームパターンを発生させるために超音波が組合されている状態を示しており、スピーカアレーの音圧指向特性により許容された範囲内を示す。

【図8】スピーカが半波長間隔で配置されている場合における、異なる周波数についての遅延ビーム形成器の指向性パターンを示すグラフ。

【図9】モード数が異なる場合における、1つの超音波スピーカの放射パターンを示すグラフ。

【図10】スピーカの間隔が半波長よりも大きいこと以外は図8と同一の条件であり、スピーカアレーは無指向性であると仮定した場合の状態を表すグラフ。

【図11】1グループ中の一人に選択的にテレビ番組の

16

音量を大きくすることに本発明を応用した様子を示す斜視図。

【図12】1グループ中の一人に選択的にサブチャンネル音声、例えば、英語の音声トラックを聞こえるようにすることに本発明を応用した様子を示す斜視図。

【図13】従来のサラウンドの構成を示す斜視図。

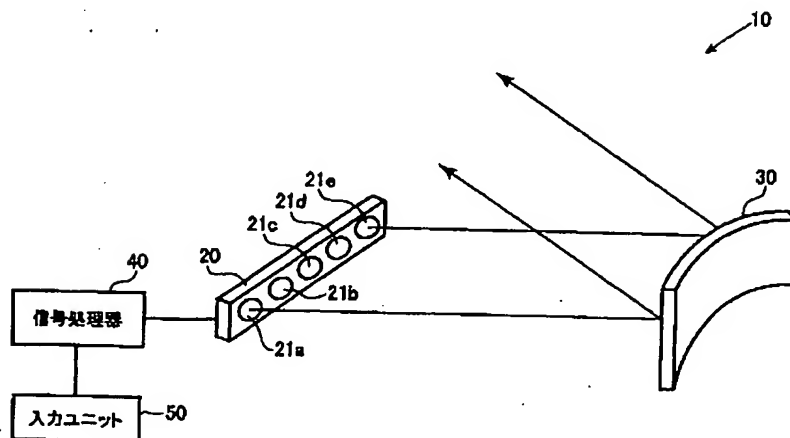
【図14】本発明によるサラウンドの構成を示す。

【図15】スピーカアレーが1次元ではなく2次元である、本発明の他の実施例を示す概念図。

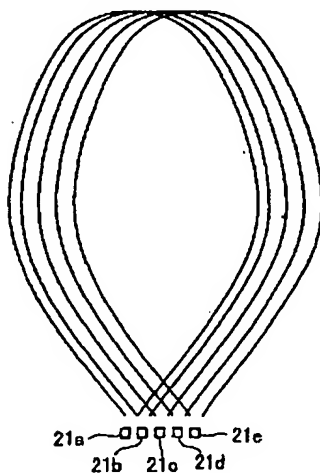
10 【符号の説明】

10	超音波スピーカシステム
21a～21e	超音波スピーカ
30	凸面反射板
41	プリプロセッサ
42	超音波モジュレータ
43a～43e	遅延線路

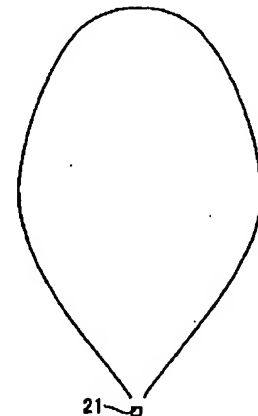
【図1】



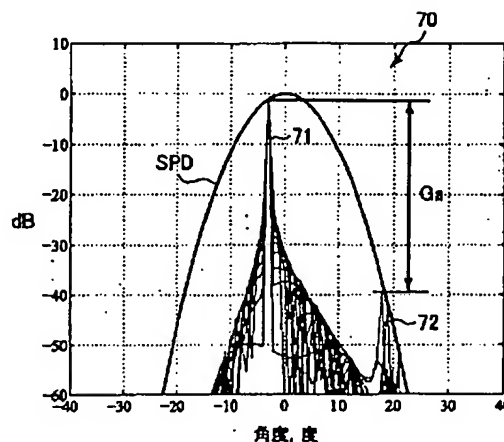
【図4】



【図3】

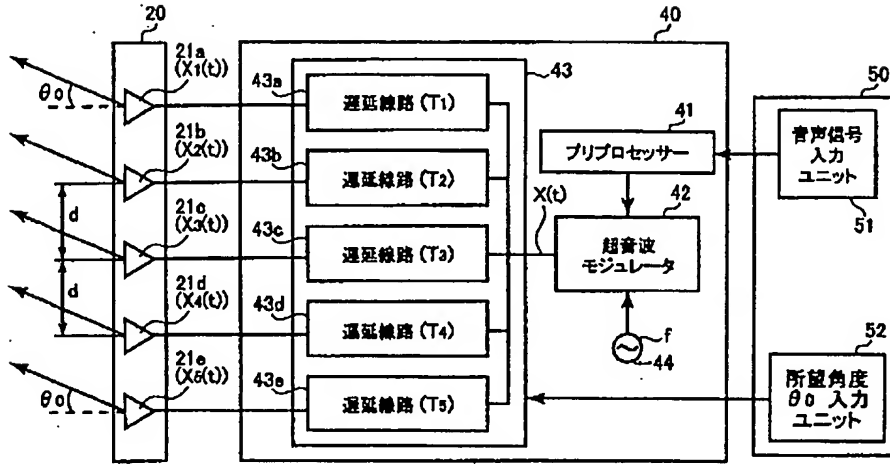


【図5】

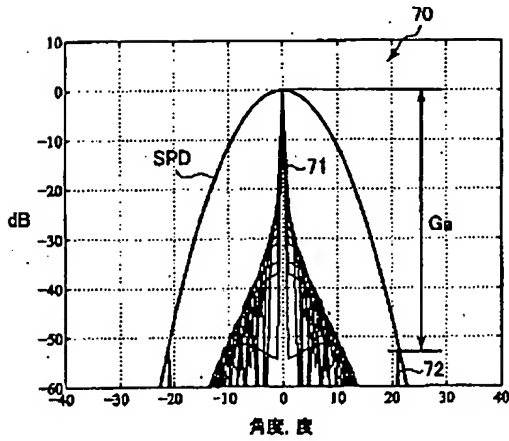


(10)

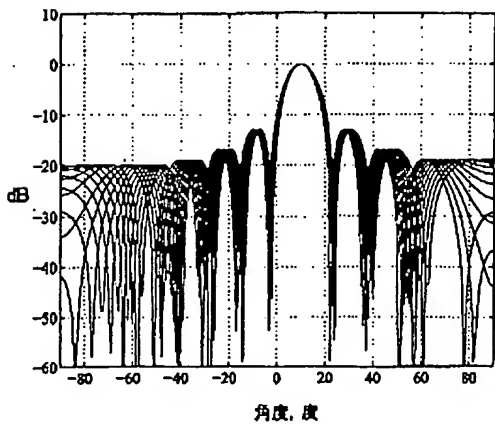
【図2】



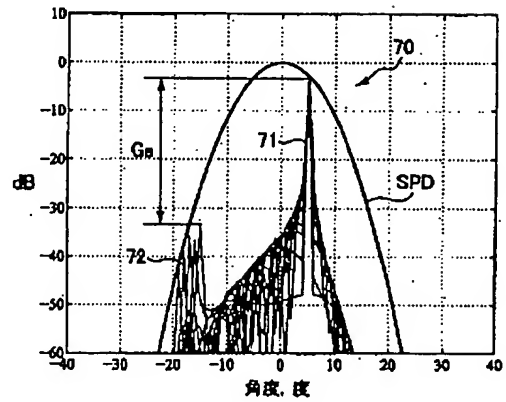
【図6】



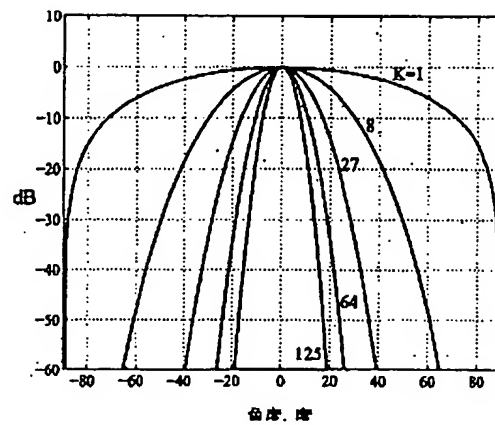
【図8】



【図7】

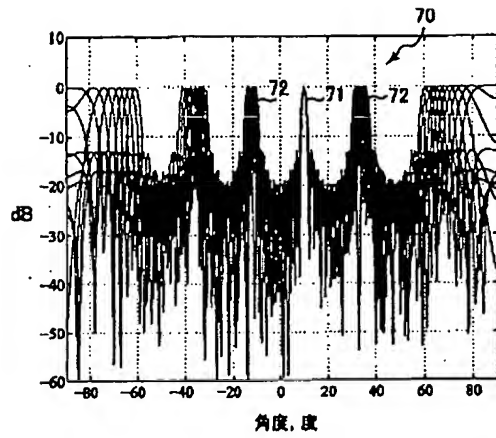


【図9】

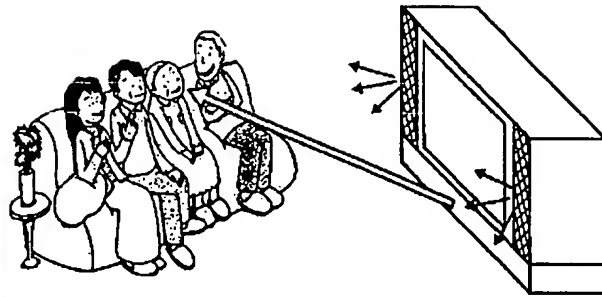


(11)

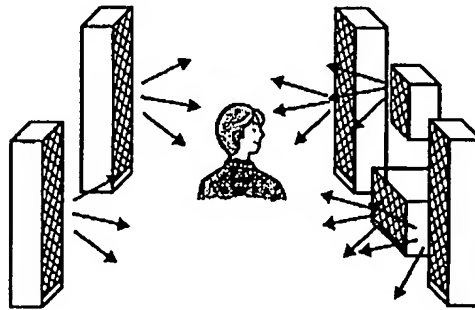
【図10】



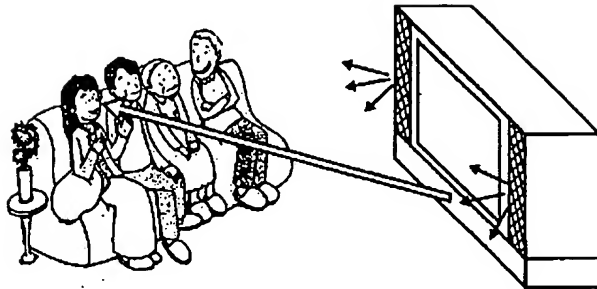
【図11】



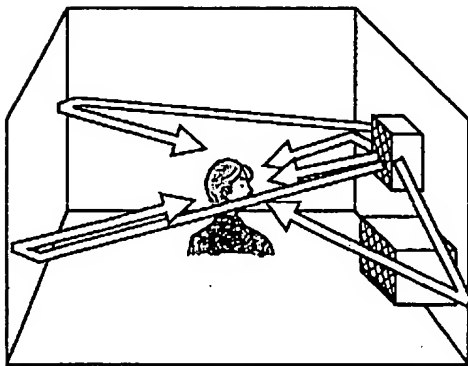
【図13】



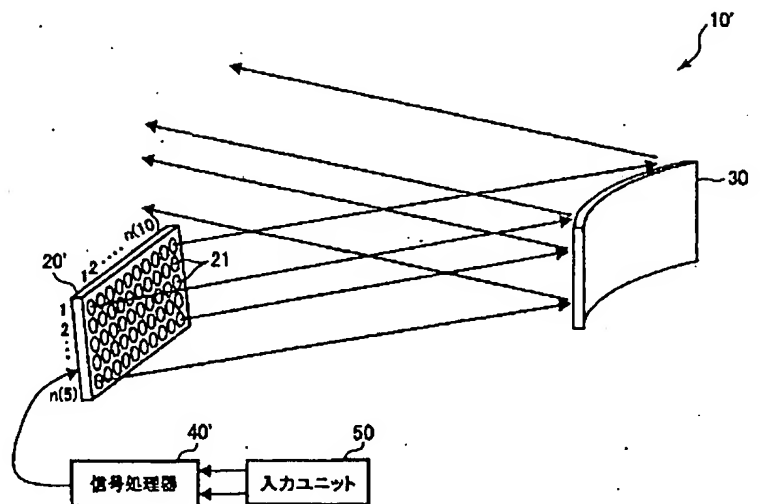
【図12】



【図14】



【図15】



(12)

フロントページの続き

(72) 発明者 モハマッド ガバミ  
東京都品川区東五反田 3 丁目 14 番 13 号 株  
式会社ソニーコンピュータサイエンス研究  
所内

F ターム (参考) 5D019 AA02 BB18  
5D020 AC11

【外国語明細書】

## ULTRASONIC SPEAKER SYSTEM CAPABLE OF STEERED BEAM RADIATION

### BACKGROUND OF THE INVENTION

#### 1. Field of the Invention

The present invention relates to an ultrasonic speaker system.

#### 2. Description of the Related Art

A conventional speaker generates sound waves that radiate in a broad pattern. Although it is theoretically possible to form a sharp and directive audio beam using an array of speakers, the array must include a large number of loudspeakers. Also, the array would take up a great deal of space because of relatively long wavelengths from audible speakers, that is, in the range of 17.40 to 1.74 meters, and also because of the characteristics of the wave motion.

On the other hand, an ultrasonic transducer (speaker) array can produce a narrow-width sound beam. An ultrasonic signal is amplitude modulated by an audio signal and used to drive the ultrasonic transducer array, to produce an amplitude-modulated ultrasonic beam. The amplitude-modulated ultrasonic beam becomes demodulated when propagated through air because of the non-linear propagation characteristics of air. Only audible sound with frequencies other than the ultrasonic signal remains. Parametric arrays use this phenomenon to produce a "sound spotlight" that is audible only by people at the location of the sound spotlight.

(14)

European Patent 0 973 152 A2 proposes reflecting such a narrow-width ultrasonic beam from a rotatable reflecting surface. The ultrasonic beam can be steered to a desired location by rotating the reflecting surface. If the ultrasonic beam is reflected onto a second surface that absorbs ultrasonic frequencies but reflects audible frequencies, then the audible sound will appear to originate from the second surface. If the second surface is a movie screen, then the audible sound can be made to follow characters of the movie across the screen by rotating the reflecting surface.

European Patent 0 973 152 A2 also discusses the possibility of using a curved surface that absorbs ultrasonic sound but reflects audible sound, so that all audible reflections can be directed to a specific listening area.

European Patent 0 973 152 A2 describes a transducer array with a plurality of ultrasonic transducer modules arranged in a two- or three-dimensional configuration. A network applies variable relative phases to signals applied to the transducer modules in order to facilitate electronic focusing or steering. Because the signal is wideband, it is possible to use delay to steer the beam from the array.

#### SUMMARY OF THE INVENTION

The present inventors attempted to produce an



(15)

ultrasonic speaker system capable of beam steering using piezoelectric-type ultrasonic transducers. Piezoelectric-type ultrasonic transducers range in size from 1 cm to 4 cm in diameter. When attempting to assemble the ultrasonic transducers into an array, the inventors discovered it is extremely difficult to provide the standard half wavelength spacing between the ultrasonic transducers, because the half wavelength of an ultrasonic wave is so small, that is, in the order of millimeters. The inventors realized that such an arrangement for steering an ultrasonic beam produced from an ultrasonic transducer array would be difficult to realize because the ultrasonic transducer elements would have to be very small and separated by only a very short distance.

It is an objective of the present invention to overcome the above-described problem and provide an ultrasonic speaker system that enables more free arrangement of speakers in the array.

An ultrasonic speaker system according to the present invention includes an ultrasonic modulator, a plurality of delay lines, and a plurality of ultrasonic speakers connected in a one-to-one correspondence to the delay lines. The ultrasonic modulator modulates, based on an input audio signal, an ultrasonic signal that has a center frequency  $f$  and outputs a modulated ultrasonic signal accordingly. The delay lines receive the modulated ultrasonic signal from the

(16)

ultrasonic modulator and output the modulated ultrasonic signal each with a different delay for beam steering to an angle  $\theta_0$ . The ultrasonic speakers output, according to the modulated ultrasonic signal as delayed by the delay lines, ultrasonic waves in a beam pattern steered to the angle  $\theta_0$ . The ultrasonic speakers are disposed with center-to-center distance  $d$  that is greater than half-wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves, resulting in the beam pattern including a main lobe and at least one grating lobe. The main lobe has a mode number  $K$  and a grating lobe nearest to the main lobe has an attenuation  $G_g$  with respect to attenuation at the main lobe. Values of the distance  $d$ , the frequency  $f$ , the mode number  $K$ , the attenuation  $G_g$ , and the angle  $\theta_0$  are related as follows:

$$G_g = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]$$

wherein  $c$  is the speed of sound.

Because the ultrasonic speakers have a center-to-center distance  $d$  of more than the half wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves, a very sharp beam can be produced so that the sound can be focused on a very selective audience.

The present inventors recognized that the values of the distance  $d$ , the frequency  $f$ , the mode number  $K$ , the

(17)

attenuation  $G_a$ , and the angle  $\theta_0$  are related in the claimed manner. A speaker system designer can use this relationship to easily calculate the radiation pattern of the speakers by designating what level of attenuation  $G_a$  is acceptable and solving for mode number  $K$  as follows:

$$K = \frac{G_a}{20 \log \left[ \frac{\cos \theta_0}{\cos \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]}$$

The designer substitutes the mode number  $K$  in the following formula to determine what radiation pattern a speaker needs to have to suppress grating lobes:

$$A_1(\theta) = \cos^K(\theta)$$

Because delay lines apply a delay to the modulated ultrasonic signal before the ultrasonic speakers output the ultrasonic waves, the beam steering can be electrically controlled, rather than physically controlled.

It is desirable to provide a convex reflector in the path of the main lobe for increasing steering angle. Because a convex reflecting surface is used, the limited range of desired angles can be magnified, for example, from only a few degrees to over ten degrees.

It is further desirable to provide a preprocessor for processing the audio signal input to the ultrasonic modulator to reduce distortion of outputted audible sound.

(18)

It is further desirable that the ultrasonic speakers be a piezoelectric type. Piezoelectric type ultrasonic speakers are inexpensive. However, because of their fairly large size, from 1 cm to 4 cm in diameter, are difficult to space close together. The present invention allows use of inexpensive piezoelectric type ultrasonic speakers because the spacing is set to greater than the half wavelength  $\lambda/2$ .

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

The above and other objects, features and advantages of the invention will become more apparent from reading the following description of the embodiment taken in connection with the accompanying drawings in which:

Fig. 1 is a schematic view showing an ultrasonic speaker system according to an embodiment of the present invention;

Fig. 2 is a block diagram showing the ultrasonic speaker system of Fig. 1;

Fig. 3 is a schematic view showing sound pressure directivity of an individual ultrasonic speaker of the ultrasonic speaker system;

Fig. 4 is a schematic view showing sound pressure directivity of an ultrasonic speaker array of the ultrasonic speaker system;

Fig. 5 is a graph representing ultrasonic waves from the speaker array, which has center-to-center speaker

(19)

spacing of greater than half wavelength, the ultrasonic waves combining to generate an ultrasonic beam pattern with a narrow main lobe steered to  $-3^\circ$  within the range allowed by the sound pressure directivity of the speaker array;

Fig. 6 is a graph representing ultrasonic waves from the speaker array combining to generate an ultrasonic beam pattern with a main lobe steered to  $0^\circ$  ;

Fig. 7 is a graph representing ultrasonic waves from the speaker array combining to generate an ultrasonic beam pattern with a main lobe steered to  $+5^\circ$  within the range allowed by the sound pressure directivity of the speaker array;

Fig. 8 is a graph representing directional patterns of a delay beamformer for different frequencies wherein element spacing is half wavelength;

Fig. 9 is a graph representing radiation patterns of a single ultrasonic speaker for different values of a mode number;

Fig. 10 is a graph representing the same conditions as Fig. 8, but with element spacing of greater than half wavelength, assuming the speaker array is non-directional;

Fig. 11 is a perspective view showing the present invention applied to enhance volume of a television program selectively for a single viewer of a group of viewers;

Fig. 12 is a perspective view showing the present

(20)

invention applied to direct a sub-channel sound, for example, an English-language sound track, selectively to a single viewer of a group of viewers;

Fig. 13 is a perspective view showing a conventional surround sound configuration;

Fig. 14 is a surround sound configuration according to the present invention; and

Fig. 15 is a schematic view showing another embodiment of the present invention, wherein the speaker array is a two-dimensional array rather than a one-dimensional array.

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE EMBODIMENT

Next, an ultrasonic speaker system 10 according to an embodiment of the present invention will be described while referring to the attached drawings. As shown in Fig. 1, the system 10 includes an ultrasonic speaker array 20, a convex reflector 30, a signal processor 40, and an input unit 50. The ultrasonic speaker array 20 includes a row of five piezoelectric type ultrasonic speakers 21a to 21e.

As shown in Fig. 2, the input unit 50 includes an audio signal input unit 51 that inputs an audio signal representing audible sound and a desired angle  $\theta$ , input unit 52 that inputs data representing the desired angle  $\theta$ , for beam direction into the signal processor 40.

The signal processing circuit 40 includes a preprocessor 41, an ultrasonic wave modulator 42, a variable

(21)

delay unit 43, and an ultrasonic signal source 44. The preprocessor 41 performs preprocesses on the audio signal from the audio signal input unit 51 to reduce distortion of outputted audible sound. The preprocessor 42 operates in the manner described by F. Joseph Pompei in "The Use of Airborne Ultrasonics for Generating Audible Sound Beams," The Journal of Audio Eng. Soc., Vol. 47, No. 9, 1999 September, the content of which is incorporated herein by reference.

The ultrasonic signal source 44 outputs an ultrasonic signal to the ultrasonic modulator 42. The ultrasonic signal has a center frequency  $f$  that is higher than 20 KHz. The ultrasonic modulator 42 modulates the ultrasonic signal based on input of the audio signal processed by the preprocessor 41 and outputs a modulated ultrasonic signal  $x(t)$  accordingly to the variable delay unit 43.

The variable delay unit 41 includes a plurality of adjustable delay lines 43a to 43e. The delay lines 41a to 43e each receive the modulated ultrasonic signal from the ultrasonic modulator 42 and output the modulated ultrasonic signal each with a different delay for beam steering to the desired angle  $\theta_0$ , that was input from the desired angle  $\theta_0$  input unit 52. The delay time set for the variable delay circuit is calculated for each speaker 21a to 21e according to the desired beam angle  $\theta_0$ .

As shown in Fig. 3, each speaker 21 of the array 20

(22)

has a sound pressure directivity of a few degrees to ten degrees. As shown in Fig. 4, the array 20 is made from aligning the five ultrasonic speakers 21a to 21e in a one dimensional array. The five ultrasonic speakers 21a to 21e are connected in a one-to-one correspondence with the delay lines 43a to 43e. As a result, the speakers 21a to 21e generate different ultrasonic waves according to the modulated ultrasonic signal as delayed by the delay lines 43a to 43e. As shown in Figs. 5, 6, and 7, the ultrasonic waves combine to generate an ultrasonic beam pattern 70 with a main lobe 71 steered to the desired angle  $\theta_0$  ( $= -3^\circ, 0^\circ$ , and  $+5^\circ$  in Figs. 5, 6, and 7, respectively). As the ultrasonic beam propagates through the air, audible sound is generated because of the nonlinear nature of air.

The ultrasonic speakers 21a to 21e are spaced with a center-to-center distance  $d$  that is greater than the half-wavelength  $\lambda/2$  at the center frequency of the ultrasonic carrier waves emitted from the speakers 21a to 21e. Because the center-to-center distance  $d$  is greater than the half-wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves, it is much easier to arrange the speakers 21a to 21e in the array 20. Also, as shown in Figs. 5, 6, and 7, the resultant beam pattern 70 has a main lobe 71 with a desirable narrow width. Because the main beam is sharper, it can be directed to a more specific audience. In contrast, Fig. 8 shows a beam pattern



(23)

generated when the center-to-center distance  $d$  is equal to the half-wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves. Note the wide main lobe.

The main lobe 71 has a mode number  $K$ , which influences the width of the lobe 71. That is, as shown in Fig. 9, the larger the value  $K$ , the narrower the beam width.

As shown in Figs. 5, 6, and 7, when the center-to-center distance  $d$  is greater than the half-wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves, then the resultant beam pattern 70 also includes at least one grating lobe 72. The grating lobe 72 nearest to the main lobe 71 has an attenuation  $G_a$  with respect to attenuation at the main lobe 71. Any other grating lobes have a much higher attenuation.

As will be described later, the values for the center-to-center distance  $d$ , the frequency  $f$ , the mode number  $K$ , the attenuation  $G_a$ , and the angle  $\theta_0$  are related as follows:

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right] \quad (1)$$

wherein  $c$  is the speed of sound.

Fig. 10 shows a beam pattern emitted from a speaker array with individual speakers separated by a center-to-center distance  $d$  of 1.5 cm. The speakers emit ultrasonic waves with frequency from 55 KHz to 65 KHz, that is, a half

(24)

wavelength  $\lambda / 2$  of from 2.6 mm to 3.1 mm. Therefore, the center-to-center distance  $d$  is much greater than the half wavelength  $\lambda / 2$ . As a result, grating lobe beams 72 are generated to the left and right of the main (0) beam 71, which points perpendicular to the speaker surface.

The example shown in Fig. 10 assumes that the sound waves are generated in all directions, that is, without directionality, and have the same amplitude and phase. However, the ultrasonic speaker array actually has sound pressure directivity SPD only in a narrow range as indicated by the arc-shaped line in Fig. 6. Therefore, the actual beam pattern appears as shown in Fig. 6. That is, the beam pattern is the product of the beam pattern of Fig. 10, which assumes non-directionality, and the sound pressure directionality SPD of the speaker itself. The grating lobes can be reduced by properly utilizing the audio pressure directionality of the speakers themselves, so that a beam in only a desired direction is synthesized, and beams in undesirable directions, that is, grating lobes, can be removed.

Direction of sound waves from the speaker array 20 can be swung by the desired angle  $\theta_0$  left or right by changing the delay time at the delay lines 43a to 43e. However, the range of possible angles is limited by the audio pressure directionality of the speakers as shown in Figs. 5 and 7. In

(25)

some cases, the angle range is limited by the radiation pattern of the ultrasonic speaker array 20 from a few degrees to about 20 degrees. Also, the range of possible steering angles is limited by practical limits of values used in equation (1). By providing the convex reflector 30, the angle range at which the beam can be swung can be greatly broadened.

Here, examples will be provided for applications of the ultrasonic speaker system according to the present invention.

Fig. 11 shows an example where a television viewer who is hard of hearing is watching television in a room with people having ordinary hearing ability. The beam of high-volume audible sound is directed to the television viewer who is hard of hearing. Because the beam is louder than the normal non-directed radiation of sound, the hard-of-hearing viewer can more easily hear it. However, because the beam has high directionality, it does not annoy the surrounding television viewers.

Fig. 12 shows an example of a group of people watching a television program broadcasted with both Japanese- and English-language tracks. A beam of the English-language track is directed to one member of the group who wishes to listen to the English version of the program, while the other members listen to the non-direction radiation of the

(26)

Japanese language version.

Figs. 13 shows how surround sound is conventionally realized in the conventional manner using five speakers and one subwoofer. Fig. 14 shows how surround sound is realized according to the present invention by emitting five highly-directed sound beams from a single speaker. By reflecting the beams off walls as needed, the listener hears sound from five different directions. The beam directions can be easily adjusted to take into account the shape of the room and the like.

Next, the basic theory behind the present invention will be explained.

Each of the adjustable delay lines 43a to 43e can be referred to as  $T_n$ ,  $n=1,2,\dots,N$ , where  $N$  is the number of speakers in the speaker array 20, that is,  $N$  is five in the embodiment. The adjustable delay lines  $T_n$  are controlled by the desired angle  $\theta_0$  of the main lobe of the directional beam pattern as follows:

$$T_n = T_0 + (n-1) \frac{d}{c} \sin \theta_0 \quad (2)$$

The constant delay  $T_0 \geq (N-1) \frac{d}{c}$  is required because without  $T_0$ , a negative delay will be obtained for negative values of  $\theta_0$ , which can not be implemented. The signal received at far field in the direction  $\theta$  ( $-90 < \theta < +90$ ),

(27)

is equal to:

$$\begin{aligned} y(t) &= A(\theta) \sum_{n=1}^N x_n(t - \tau_n) \\ &= A(\theta) \sum_{n=1}^N x(t - T_n - \tau_n) \end{aligned} \quad (3)$$

wherein  $x_n(t)$  is the signal transmitted from speaker  $n$ ,

$\tau_n$  is the delay from the different distances between the elements and the audience, and

$A(\theta)$  is the overall gain of the elements and the path.

The time delay  $\tau_n$  in the example of Fig. 2 is equal to:

$$\tau_n = \tau_0 - (n-1) \frac{d}{c} \sin \theta \quad (4)$$

wherein  $\tau_0$  is the constant transmission delay of the first speaker  $x_1(t)$  and is independent of the far-field reception direction  $\theta$ .

The gain  $A(\theta)$  can be divided into the following two components:

$$A(\theta) = A_1(\theta) A_2 \quad (5)$$

where  $A_1(\theta)$  is the angle-dependent gain of the elements, and

$A_2$  is the attenuation due to the distance.

Substituting equations (4) and (5) into equation (3) yields:

(28)

$$y(t) = A_1(\theta) A_2 \sum_{n=1}^N x(t - \alpha_0 - (n-1) \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta)) \quad (6)$$

where  $\alpha_0 = T_0 + \tau_0$ .

In the frequency domain:

$$\begin{aligned} H(f, \theta) &= \frac{Y(f, \theta)}{X(f)} \\ &= A_1(\theta) A_2 e^{-j2\pi f \alpha_0} \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi f (n-1) \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta)} \\ &= A_1(\theta) A_2 e^{-j2\pi f \alpha_0} e^{-j\pi f (N-1) \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta)} \\ &\quad \frac{\sin \left[ \pi f N \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta) \right]}{\sin \left[ \pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta) \right]} \end{aligned} \quad (7)$$

From equation (7), it is apparent that beam formers produce different directional patterns for different frequencies. Fig. 8 is a graph showing directional patterns produced by a beam-forming speaker array with center-to-center speaker distance  $d$  of the half wavelength  $\lambda/2$ , for 11 frequencies uniformly distributed from 55 to 65 KHz. The example of Fig. 8 shows the normalized amplitude of equation (7), wherein the following conditions are substituted into equation (7): an AM signal with a center frequency  $f$  of 60 KHz and bandwidth of 10 KHz, a far-field reception direction  $\theta$  of  $10^\circ$ ,  $-90^\circ < \theta < +90^\circ$ , number of speakers  $N$  of 10, center-to-center speaker distance  $d$  of 2.6 mm, speed of

(29)

sound  $c$  of 340 m/s, and perfect speakers, that is, the angle-dependent gain  $A(\theta)$  equals the distance-related attenuation  $A_2$ . It can be seen that the signal-to-noise ratio dB is the same for all frequencies, that is, the signal-to-noise ratio is completely independent of the frequency, when the desired beam angle  $\theta_0$  is the same as the far-field reception direction  $\theta$ , but that the signal-to-noise ratio dB becomes increasing dependent on the frequency  $f$  as the difference between the desired beam angle  $\theta_0$  and the far-field reception direction  $\theta$  increases. Nevertheless, the beam former is considered wideband with a fractional bandwidth of  $10/60$ , that is, 17 percent. It should be noted that the same but unmodulated message would have a fractional bandwidth of  $5/2.5$ , that is, 200 percent. Consequently, a simple delay beam former could not be so helpful when using an unmodulated audio signal (as opposed to modulated ultrasound) because the ratio of the center frequency to the bandwidth would be so large that it would be difficult to perform beamforming. A more complex filter-based beam former would be required. In addition, because the center-to-center speaker distance  $d$  is a mere 2.6 mm, it would be very difficult or perhaps impossible to produce an actual speaker array.

A speaker array can be more easily produced by increasing the center-to-center speaker distance  $d$  to

(30)

greater than half-wavelength  $\lambda / 2$ . This increase also results in a sharper main beam. Because the main beam is sharper, it can be directed to a more specific audience. On the other hand, this increase produces undesirable grating lobes in the region where a listener of the speaker will usually be, that is, in the angle range of  $-90^\circ < \theta < +90^\circ$ .

Here, the angles of the grating lobes and the condition for their existence will be determined. First, equation (7) can be rewritten for when the far-field reception direction  $\theta$  equals the desired beam angle  $\theta_0$ , assuming that the angle-dependent gain  $A(\theta)$  equals the distance-related attenuation  $A_2$ . Said differently, equation (7) can be rewritten as follows for the main lobe assuming perfect transducers:

$$|y(f, \theta_0)| = A_2 N \quad (8)$$

The relationship of equation (8) is also established for other angles  $\theta_g$ , resulting in grating lobes at these angles. To calculate the grating lobe angles  $\theta_g$ , first from equation (7) it can be determined that:

$$|y(f, \theta_g)| = A_2 N = A_2 \frac{\left[ \sin \pi f N \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_g) \right]}{\sin \left[ \pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_g) \right]} \quad (9)$$

Now, equation (9) is solved for the grating lobe angles  $\theta_g$  in the following manner:



(31)

$$\left[ \sin \pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_s) \right] = 0$$

$$\pi f \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta_s) = m\pi \quad (10)$$

wherein  $m = +/-1, +/-2, \dots$ . The result is:

$$\theta_s = \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 - m \frac{c}{df} \right) \quad (11)$$

The first grating lobes are given for  $m = +/-1$ . It can be understood that a beam forming network will not generate grating lobes if there is no grating lobe angle  $\theta_g$  among the values  $-90 < \theta < +90$ . The worst grating lobes appear when the desired beam angle  $\theta_0$  is  $+/-90$ . It can be determined from equation (11) as follows that no grating lobes will appear when the center-to-center speaker distance  $d$  is equal to or less than the half wavelength  $\lambda/2$ :

$$\frac{c}{df} \geq 2, \text{ or } d \leq \frac{c}{2f} = \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

It is interesting to note that grating lobe angles  $\theta_g$  are not a function of the number  $N$  of speakers, but are quite dependent on the center-to-center speaker distance  $d$ .

To show that grating lobes appear when the center-to-center speaker distance  $d$  is greater than the half wavelength  $\lambda/2$ , Fig. 10 is a graph showing the same conditions as Fig. 8, but with a center-to-center speaker distance  $d$  of 15 mm, so that the center-to-center speaker

(32)

distance  $d$  is greater than the half wavelength  $\lambda/2$ . Grating lobes appear as a result of this greater inter-speaker spacing. Note that the nearest grating lobes for frequency  $f$  of 60KHz are at 33.5 and -11.8 degrees and are inconsistent with equation (11). The greater the difference between the far-field reception direction  $\theta$  and the desired angle  $\theta_0$ , the greater the frequency dependence of the beam patterns.

Note that the main beam 71 of Fig. 10 is much narrower than the main beam of Fig. 8. The corresponding equation can be derived easily. The inter-null beam width INBW is defined as the difference between the nearest two nulls around the desired beam angle  $\theta_0$ . Assuming an inter-null beam width INBW of zero, then the following relationship can be determined from equation (7):

$$\pi N \frac{d}{c} (\sin \theta_0 - \sin \theta) = m\pi \quad (13)$$

wherein,  $m = +/-1, +/-2, \dots$

The first two angles  $\theta_1$  and  $\theta_2$  around the desired beam angle  $\theta_0$  can be computed from equation (13) for  $m = +1$  and  $m = -1$ , respectively, as follows:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 - \frac{c}{dfN} \right) \quad (14)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 + \frac{c}{dfN} \right) \quad (15)$$

Hence, the difference between inter-null beam width

(33)

at the first two angles  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , that is,  $INBW \Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$ , can be determined to be:

$$INBW = \sin^{-1}\left(\sin\theta_0 + \frac{c}{dfN}\right) - \sin^{-1}\left(\sin\theta_0 - \frac{c}{dfN}\right) \quad (16)$$

It is clear that for  $\left|\sin\theta_0 \pm \frac{c}{dfN}\right| > 1$ , no nulls are present on either the left or right sides of the desired beam angle  $\theta_0$ . As a special case, the inter-null beam width  $INBW_0$  when the desired beam angle  $\theta_0$  is zero is:

$$INBW_0 = 2\sin^{-1}\left(\frac{c}{dfN}\right) \quad (17)$$

That is, increasing center-to-center speaker distance  $d$  lowers the inter-null beam width  $INBW$  and produces sharper beams. Equation (16) can be easily tested using the conditions used in the examples of Figs. 8 and 10. By substituting these conditions, the inter-null beam widths  $INBW$  for the examples of Figs. 8 and 10 can be computed as 25.6 and 4.4 degrees, respectively.

From the above discussion, it can be understood that increasing the center-to-center speaker distance  $d$  produces sharp beams, but with many grating lobes. Next, more details will be given about the directional patterns of the speakers 21 of the speaker array 20. The individual speakers are directive and with an angle-dependent normalized gain  $A_1(\theta)$  represented by the following radiation pattern:

(34)

$$A_1(\theta) = \cos^K(\theta) \quad (18)$$

wherein, K is the mode number of the radiation lobe.

Ultrasonic speakers (transducers) are produced with various frequency characteristics and directivities. Different radiation patterns of ultrasonic speakers can be approximately represented by selectively substituting the mode number K in equation (18). Fig. 9 shows radiation patterns (angle dependent normalized gain  $A_1(\theta)$ ) produced by a single ultrasonic transducer for several values of the mode number K.

If equation (18) is substituted into equation (7), and then equation (7) is calculated for when the far-field reception direction  $\theta$  equals the grating lobe angles  $\theta_g$ , then from equation (10) with  $m = \pm 1$  it can be determined that:

$$|H(f, \theta_g)| = A_2 N \cos^K(\sin^{-1}(\sin \theta_0 \pm \frac{c}{df})) \quad (19)$$

Because of the assumption of directive elements, attenuations of  $-20 \log \cos^K \theta_0 \text{ dB}$  and  $-20 \log \cos^K(\sin^{-1}(\sin \theta_0 \pm \frac{c}{df})) \text{ dB}$  are produced at the far-field reception direction  $\theta_0$  and the grating lobe angles  $\theta_g$ , respectively. The required attenuation  $G_a \text{ dB}$  at the angles of the nearest grating lobe with respect to the attenuation at the desired beam angle  $\theta_0$  can be calculated using equation (1). Therefore:

(35)

$$K = \frac{G_a}{20 \log \left[ \frac{\cos \theta_0}{\cos \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]} \quad (20)$$

The positive and negative signs ( $\pm$ ) in equation (20) are used for negative and positive values of the far-field reception direction  $\theta$ , respectively.

The appearance of center frequency  $f$  in most equations shows the frequency dependence of the calculations and results. Whenever necessary, the center frequency  $f$  of the signal's carrier can be used to estimate parameters, such as the mode number  $K$  in equation (20). For example, it can be estimated that a mode number  $K$  of 85.7 is required for the array of the example shown in Fig. 10 when 30 dB is acceptable for the attenuation  $G_a$  at the angles of the nearest grating lobes at far-field reception direction  $\theta_0$  of  $\pm 5^\circ$ . Figs. 5, 6, and 7 show the overall directional patterns of the speaker array with the mode number  $K$  of 85.7 in the case of a desired beam angle  $\theta_0$  of  $-3^\circ$ ,  $0^\circ$ , and  $5^\circ$ , respectively. Higher mode numbers  $K$  produce more attenuation  $G_a$  of the grating lobes, but simultaneously reduces the range of useful angles  $\theta_0$  of the beam steering. There is a trade-off between the attenuation  $G_a$  and useful angles  $\theta_0$ . If the mode number  $K$  is fixed and a desired attenuation  $G_a$

(36)

with respect to attenuation at the main lobe is set, then equation (20) can be solved for the desired beam angle  $\theta_0$  by trial and error to determine the range of useful angles  $\theta_0$  of the corresponding speaker array.

While the invention has been described in detail with reference to specific embodiments thereof, it would be apparent to those skilled in the art that various changes and modifications may be made therein without departing from the spirit of the invention, the scope of which is defined by the attached claims.

For example, although the embodiment describes the speaker array 20 as having a row of five ultrasonic speakers, ten ultrasonic speakers provides the same effects.

Also, a two-dimensional speaker array 20' as shown in Fig. 15 could be used instead. The speaker array 20' includes  $n$  rows and  $m$  columns of speakers 21. In this case, the signal processor 40' includes a delay line for each column of speakers and the signal from each delay line is sent to all the speakers in the corresponding column. The vertical alignment of speakers in each column increases power of the generated sound waves.

(37)

What is claimed is:

1. An ultrasonic speaker system comprising:

an ultrasonic modulator for modulating, based on an input audio signal, an ultrasonic signal that has a center frequency  $f$  and outputting a modulated ultrasonic signal accordingly;

a plurality of delay lines for receiving the modulated ultrasonic signal from the ultrasonic modulator and outputting the modulated ultrasonic signal each with a different delay for beam steering to an angle  $\theta_0$ , and

a plurality of ultrasonic speakers connected in a one-to-one correspondence to the delay lines, the speakers outputting, according to the modulated ultrasonic signal as delayed by the delay lines, ultrasonic waves in a beam pattern steered to the angle  $\theta_0$ , the ultrasonic speakers being disposed with center-to-center distance  $d$  that is greater than half-wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves, resulting in the beam pattern including a main lobe and at least one grating lobe, the main lobe having a mode number  $K$ , a grating lobe nearest to the main lobe having an attenuation  $G_a$  with respect to attenuation at the main lobe, values of the distance  $d$ , the frequency  $f$ , the mode number  $K$ , the attenuation  $G_a$ , and the angle  $\theta_0$  being related as follows:

(38)

$$G_s = 20 \log \left[ \frac{\cos^x \theta_0}{\cos^x \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]$$

wherein  $c$  is the speed of sound.

2. An ultrasonic speaker system as claimed in claim 1, further comprising a convex reflector disposed in the path of the main lobe for increasing steering angle.

3. An ultrasonic speaker system as claimed in claim 1, further comprising a preprocessor for processing the audio signal input to the ultrasonic modulator to reduce distortion of outputted audible sound.



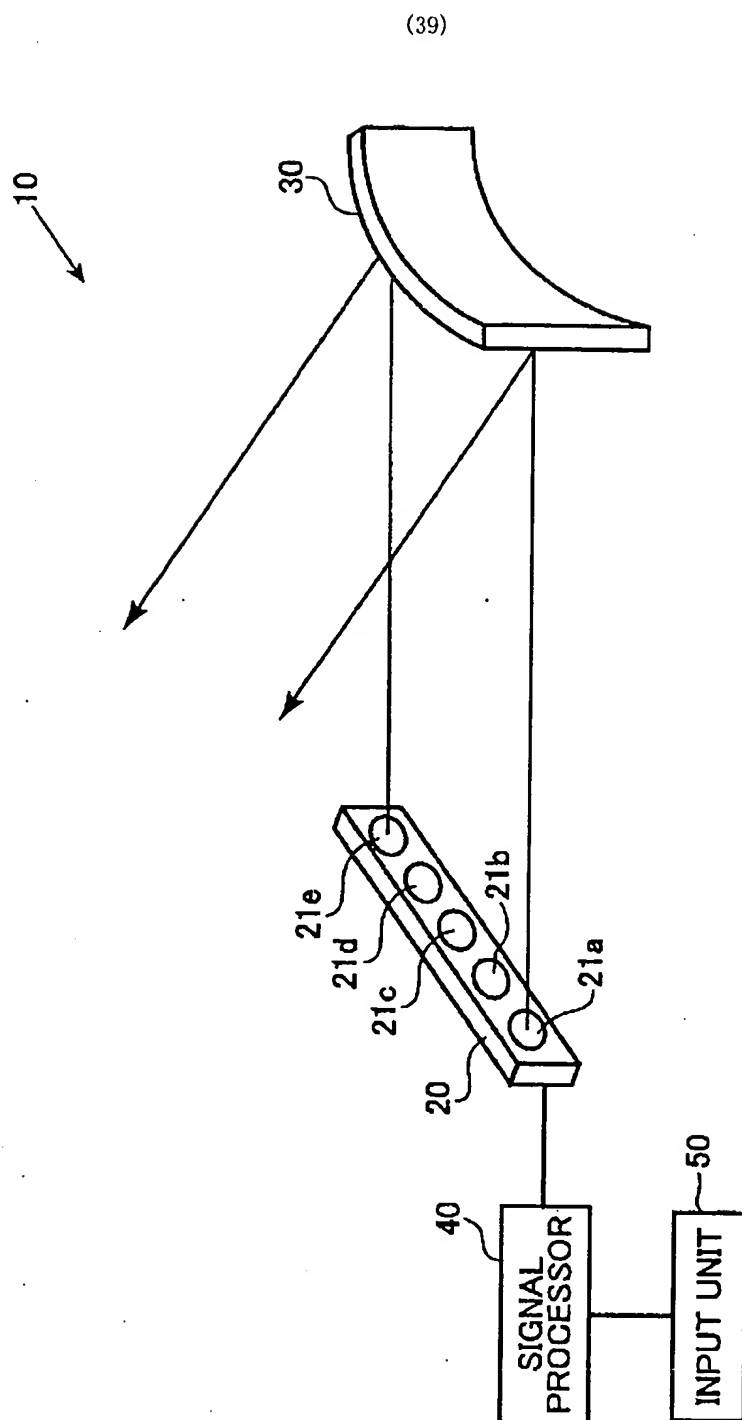


FIG. 1

(40)

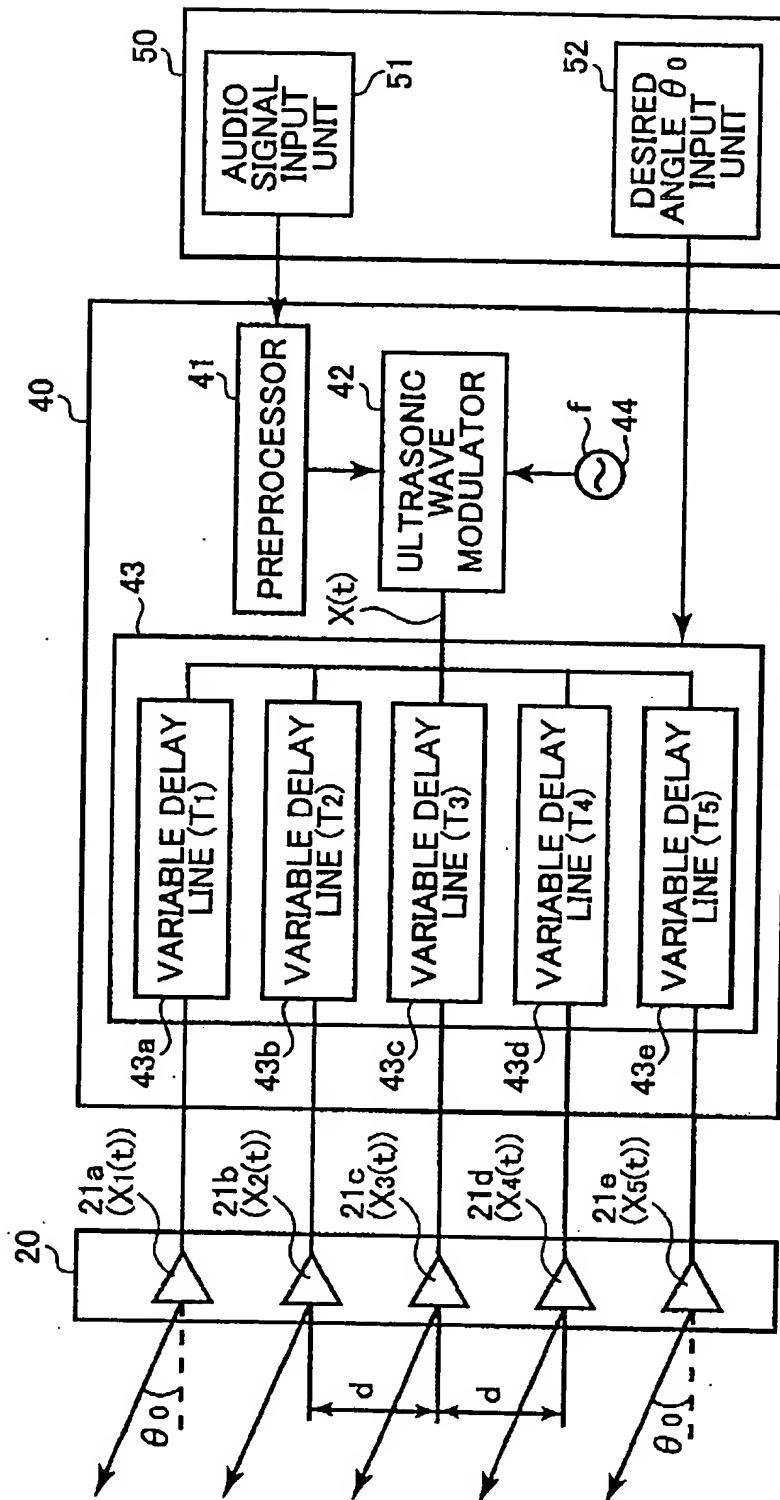


FIG.2

(41)

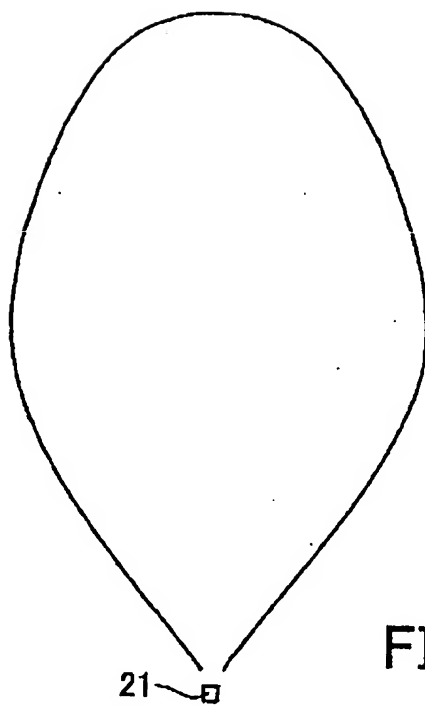


FIG. 3

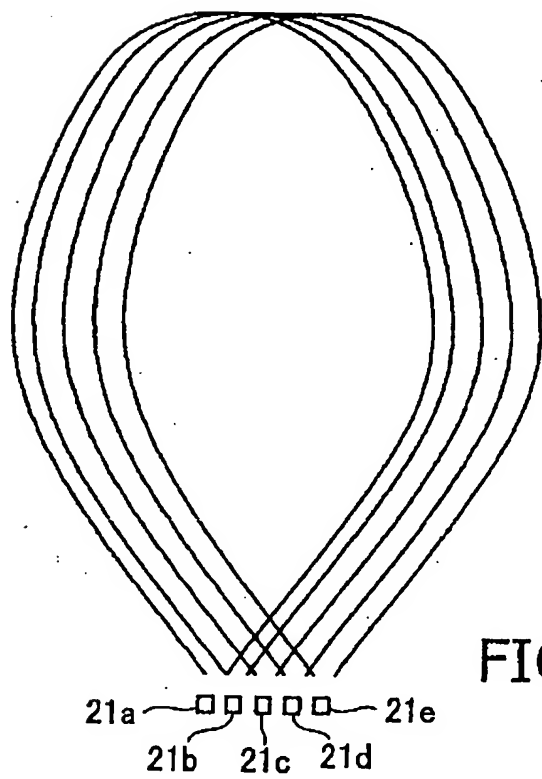


FIG. 4

(42)

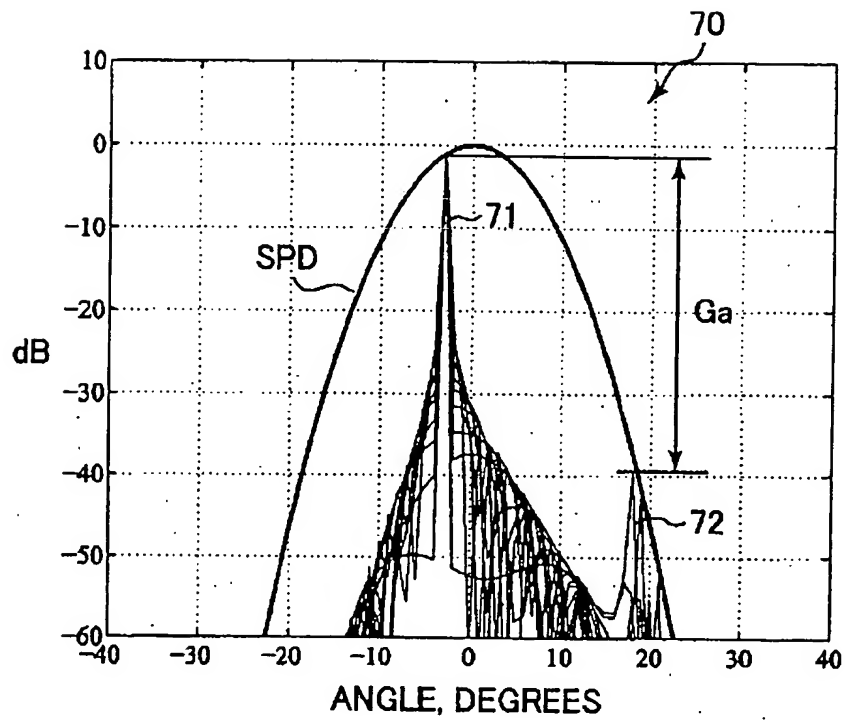


FIG. 5

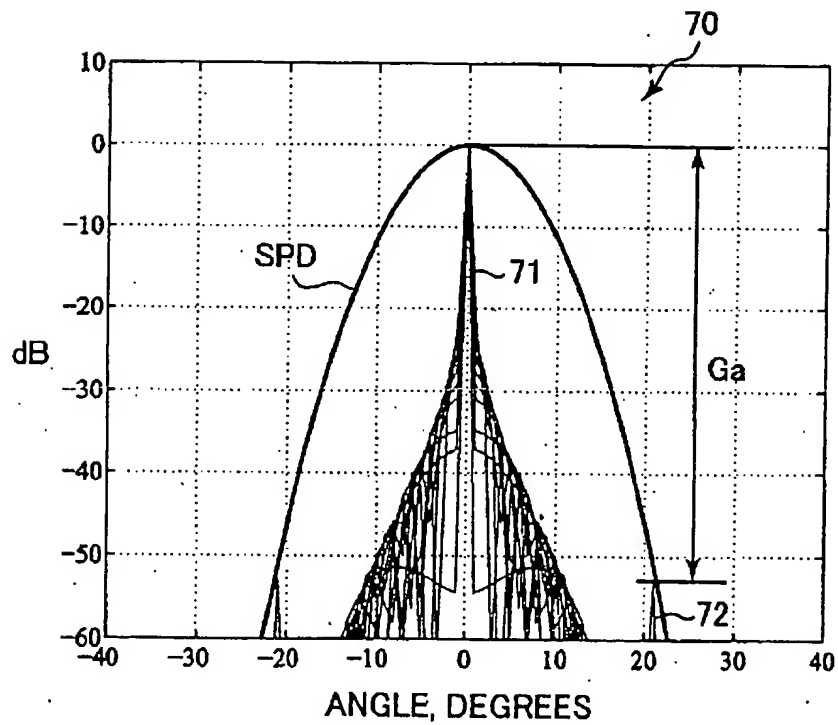


FIG. 6

(43)

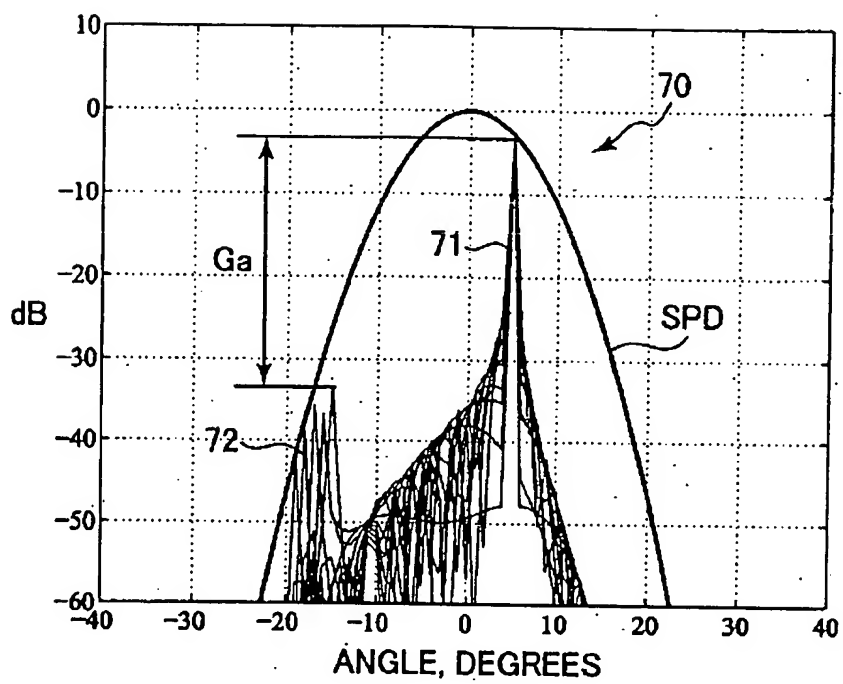


FIG. 7

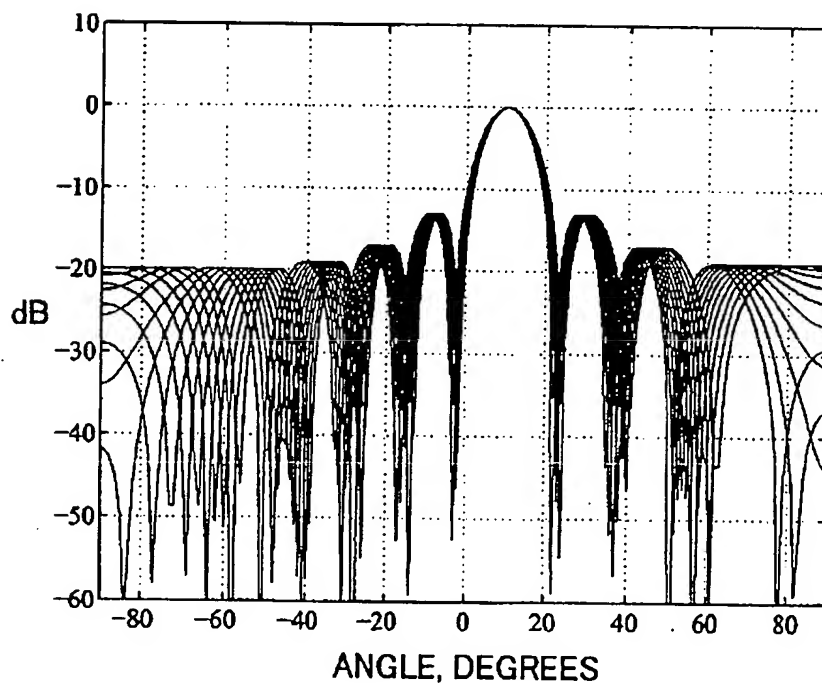


FIG. 8

(44)

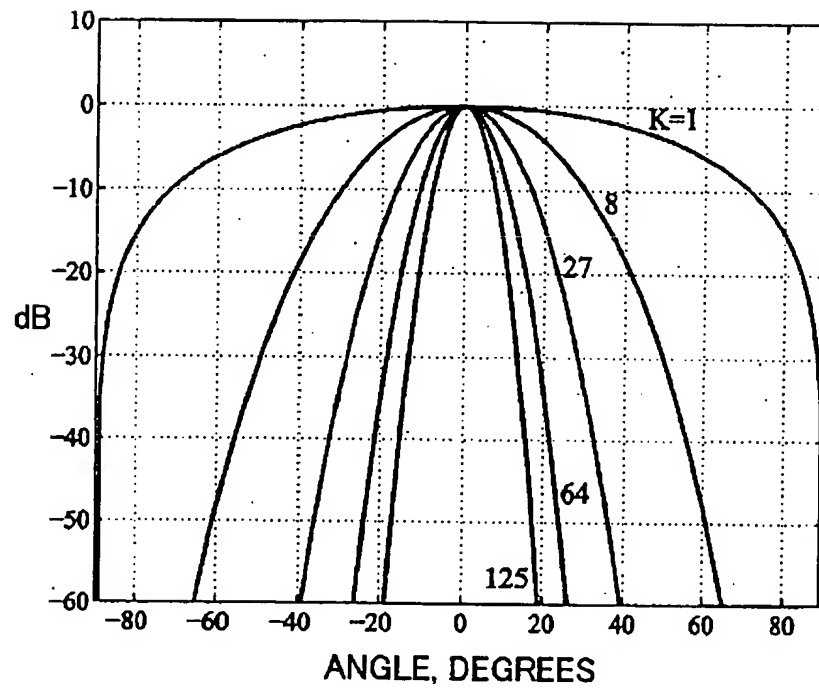


FIG. 9

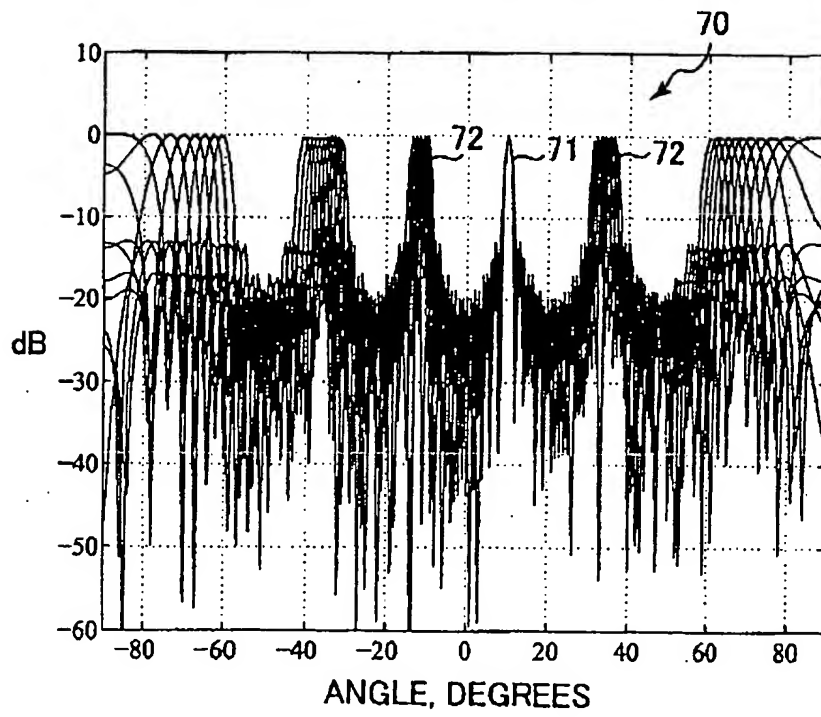


FIG. 10

(45)

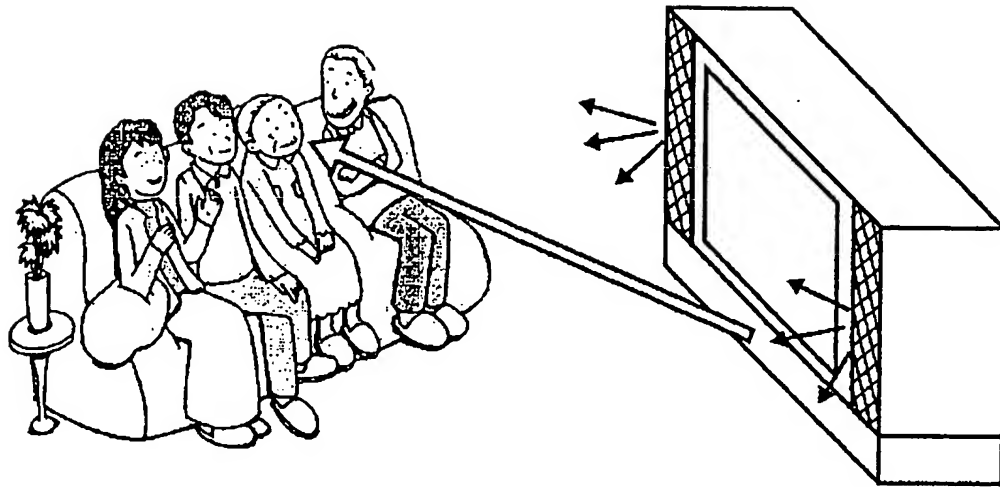


FIG.11

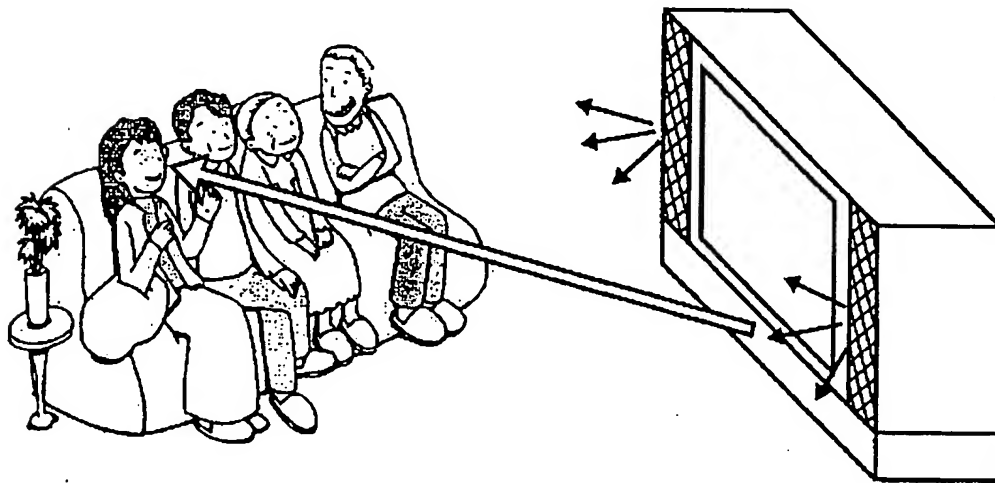


FIG.12

(46)

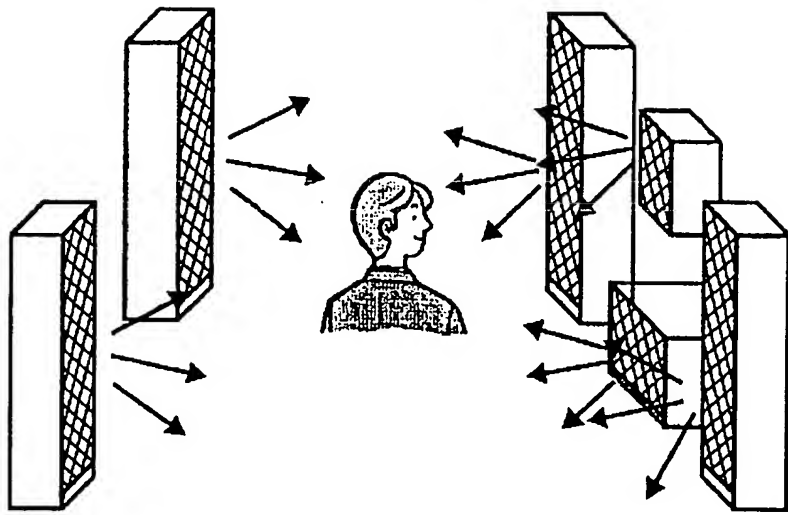


FIG. 13

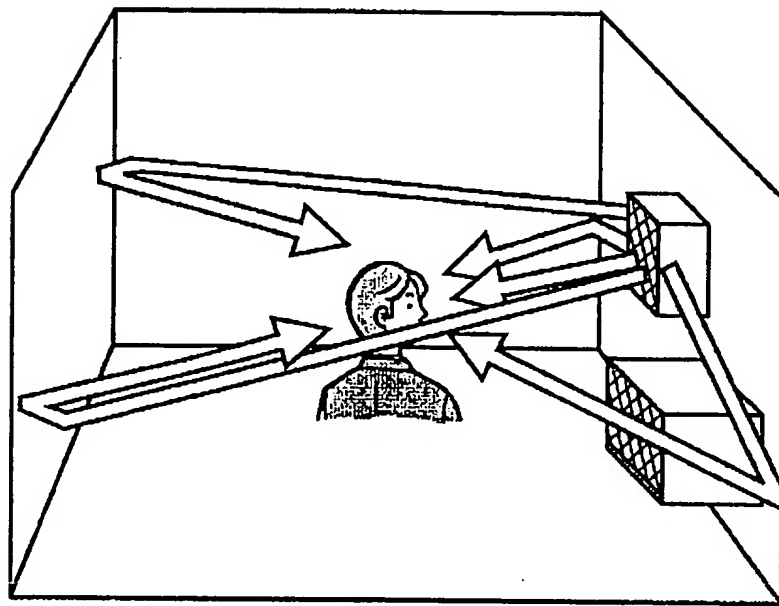


FIG. 14



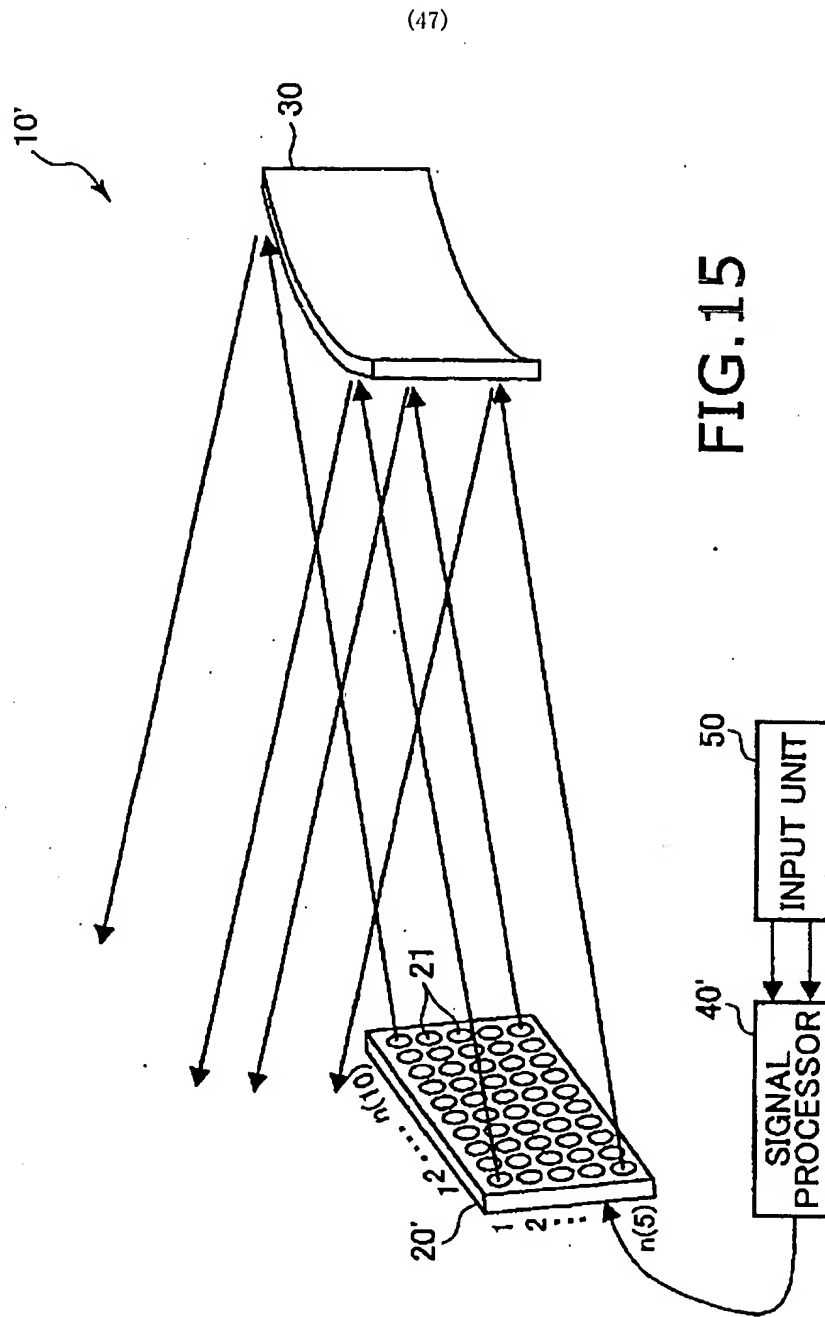


FIG. 15

## ABSTRACT

An ultrasonic speaker system includes an ultrasonic modulator, a plurality of delay lines, and a plurality of ultrasonic speakers connected in a one-to-one correspondence to the delay lines. The ultrasonic modulator modulates, based on an input audio signal, an ultrasonic signal that has a center frequency  $f$ . The plurality of delay lines delay the modulated ultrasonic signal from the ultrasonic modulator for beam steering to an angle  $\theta_0$ . The speakers output ultrasonic waves in a beam pattern steered to the angle  $\theta_0$ . The ultrasonic speakers are disposed with center-to-center distance  $d$  that is greater than half-wavelength  $\lambda/2$  of the ultrasonic waves. As a result, the beam pattern includes a main lobe and at least one grating lobe. The main lobe has a mode number  $K$  and the grating lobe has an attenuation  $G_a$  with respect to attenuation at the main lobe. The values of  $d$ ,  $f$ ,  $K$ ,  $G_a$ , and  $\theta_0$  are related as follows:

$$G_a = 20 \log \left[ \frac{\cos^K \theta_0}{\cos^K \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_0 \pm \frac{c}{df} \right) \right)} \right]$$

wherein  $c$  is the speed of sound.